ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

АБРАЗИВНОГО И АЛМАЗНОГО ИНСТРУМЕНТА

ИЗГОТОВЛЕНИЕ АБРАЗИВНОГО И АЛМАЗНОГО ИНСТРУМЕНТА

ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АБРАЗИВНОГО И АЛМАЗНОГО ИНСТРУМЕНТА

Будь так-
же твёрд в
достижении цели,
в овладении знаниями
как алмаз.
[illegible]
20.02.79.

ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

АБРАЗИВНОГО И АЛМАЗНОГО ИНСТРУМЕНТА

6П4.67
О 75
УДК 621.922

О 75 **Основы проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента.** Учеб. пособие для техникумов. М., «Машиностроение», 1975.

296 с. с ил.

На обороте тит. л. авт.: В. Н. Бакуль, Ю. И. Никитин, Е. Б. Верник, В. Ф. Селех.

В книге приведены свойства абразивных материалов, включая алмазы и кубический нитрид бора, характеристика порошков и паст из них, форма и размеры инструментов; описан процесс изготовления шлифпорошков и микропорошков; рассмотрены особенности проектирования и технологии изготовления абразивных, алмазных однокристальных и многокристальных инструментов; освещены вопросы эффективности использования абразивного инструмента, паст и инструментов из новых сверхтвердых материалов — славутича, исмита, эльбора-Р, гексанита-Р и др.

Книга предназначена в качестве учебного пособия для студентов техникумов и может быть полезной для инженерно-технических работников, непосредственно занятых производством и эксплуатацией абразивного и алмазного инструмента.

О $\frac{31304\text{-}142}{038(01)\text{-}75}$ 142-75 6П4.67

Авторы учебного пособия: БАКУЛЬ В. Н., НИКИТИН Ю. И., ВЕРНИК Е. Б., СЕЛЕХ В. Ф.

Рецензенты:
кандидаты техн. наук **Н. А. Розио, О. Б. Арбузов и В. И. Власов**

© Издательство «Машиностроение», 1975 г.

ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АБРАЗИВНОГО И АЛМАЗНОГО ИНСТРУМЕНТА

Под редакцией
заслуженного деятеля науки и техники УССР,
д-ра техн. наук В. Н. БАКУЛЯ

Допущено
Министерством высшего и среднего специального образования СССР
в качестве учебного пособия для техникумов

Москва „МАШИНОСТРОЕНИЕ" 1975

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3

Глава I. **Абразивные материалы и их свойства** 5

§ 1. Природные абразивные материалы 6
§ 2. Искусственные абразивные материалы 11

Глава II. **Порошки** 29

§ 1. Общие сведения 29
§ 2. Абразивные материалы в зерне 31
§ 3. Порошки из алмазов 43
§ 4. Порошки из кубического нитрида бора 67

Глава III. **Пасты** 71

§ 1. Пасты из абразивных материалов в зерне 71
§ 2. Алмазные пасты 73
§ 3. Пасты из кубического нитрида бора 75
§ 4. Применение паст 76

Глава IV. **Абразивный инструмент** 79

§ 1. Выбор и проектирование абразивного инструмента 79
§ 2. Технология изготовления абразивного инструмента 102

Глава V. **Алмазный инструмент** 144

§ 1. Проектирование алмазного абразивного инструмента 144
§ 2. Изготовление алмазного абразивного инструмента 183
§ 3. Изготовление инструмента из кристаллов алмаза 254

Глава VI. **Инструмент из кубического нитрида бора и новых сверхтвердых материалов** 280

§ 1. Абразивный инструмент из кубического нитрида бора 280
§ 2. Инструмент из новых сверхтвердых материалов 286

Список литературы 293

Предметный указатель 294

**Валентин Николаевич БАКУЛЬ, Юрий Иванович НИКИТИН,
Ефим Бенционович ВЕРНИК, Виталий Феофилович СЕЛЕХ**

ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

АБРАЗИВНОГО И АЛМАЗНОГО ИНСТРУМЕНТА

Редактор издательства *Б. П. Святов*
Технические редакторы *Л. Т Зубко* и *Т. И. Андреева*
Корректор *Н. И. Шарунина*
Переплет художника *А. Я. Михайлова*

Сдано в набор 7/X 1974 г. Подписано в печать 7/II 1975 г. Т-00481
Формат 60×90¹/₁₆ Бумага типографская № 3 Усл. печ. л. 18,5 Уч.-изд. л. 20,6
Тираж 14 000 экз. Заказ 1297 Цена 91 коп.

Издательство «Машиностроение», 107885, г. Москва, Б-78, 1-й Басманный пер., д. 3

Ленинградская типография № 6 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
193144, Ленинград, С-144, ул. Моисеенко, 10

ПРЕДИСЛОВИЕ

Повышение требований к надежности машин и приборов вызывает необходимость создания новых конструкционных материалов, обладающих необходимыми физико-механическими и эксплуатационными свойствами и, в первую очередь, высокой прочностью и износостойкостью. Такие материалы, как правило, трудно обрабатывать. Практика знает немало случаев, когда вновь созданные материалы с прекрасными эксплуатационными свойствами длительное время нельзя было использовать в промышленности из-за отсутствия инструмента для их обработки. Кроме того, требования к инструменту еще более ужесточаются потому, что для современной техники характерно постоянное повышение точности и снижение шероховатости обработки. Каким бы твердым, прочным и труднообрабатываемым ни был конструкционный материал, всегда необходим другой, еще более твердый инструментальный материал.

Метод обработки деталей машин с применением абразивных материалов известен еще с середины XIX века. В это время появляются и первые шлифовальные станки. Абразивные инструменты для них вырезали из естественных материалов — песчаника, наждака и др. Впоследствии круги стали делать из смеси абразивных частиц и цементирующей их связки. В 1891 году был получен абразивный материал — карбид кремния, а затем электрокорунд. В настоящее время искусственные абразивные материалы (карбид кремния зеленый и черный, электрокорунд различных марок, карбид бора и другие) отличаются от природных большей твердостью, высоким качеством и стабильностью свойств. Из природных абразивных материалов не потеряли своего значения только алмазы. Значение алмазного абразивного инструмента особенно возросло в начале 30-х годов, когда появились твердые сплавы, которые трудно обрабатывать обычными абразивами.

Одним из важнейших технических открытий XX века было решение проблемы синтеза алмазов. Синтетические алмазы являются самым твердым материалом, созданным человеком. Их можно производить как угодно много, тогда как добыча природных алмазов лимитируется количеством месторождений и низким содержанием алмазов в породе. Советские ученые, успешно решают также задачи по созданию технологии промышленного производства новых синтетических сверхтвердых материалов. За последнее время был

создан новый инструментальный материал, неизвестный в природе — кубический нитрид бора (иначе боразон, кубонит, эльбор). Кубический нитрид бора приближается по твердости к алмазу, но имеет более высокую теплостойкость.

На основе опыта, накопленного при синтезе алмазов, созданы новые поликристаллические материалы типа баллас и карбонадо и поликристаллы кубического нитрида бора под названием исмит, эльбор-Р, гексанит-Р и др. Эти материалы применяются для оснащения режущих инструментов, обеспечивающих в некоторых случаях высокую производительность труда и точность, ранее достигавшуюся только шлифованием. В СССР разработан новый композиционный материал — славутич, созданный специально для оснащения буровых долот и коронок для геологического бурения. Славутич успешно применяется и в других областях техники, например при правке абразивных кругов.

В совершенствовании производства и создании новых марок абразивных материалов поликристаллических и композиционных сверхтвердых материалов и высокопроизводительного оборудования для их изготовления и применения большое значение имеют работы, выполненные Всесоюзным научно-исследовательским институтом абразивов и шлифования (ВНИИАШ), Институтом физики высоких давлений АН СССР, Институтом сверхтвердых материалов АН УССР, Всесоюзным научно-исследовательским и проектно-конструкторским институтом природных алмазов (ВНИИАЛМАЗ), Институтом проблем материаловедения АН УССР, Институтом химической физики АН СССР, Экспериментальным научно-исследовательским институтом металлорежущих станков и др.

Настоящее пособие написано в соответствии с программой подготовки техников по специальности «Производство абразивного и алмазного инструмента». В работе над пособием были использованы результаты исследований, освещенные в технической литературе, материалы стандартов и опыт Института сверхтвердых материалов, накопленный при разработке технологии изготовления и внедрении инструментов из синтетических алмазов, кубонита, славутича и др. При написании учебного пособия учитывалось, что одновременно с курсом «Основы проектирования и технология производства абразивного и алмазного инструмента» учащиеся изучают также предметы «Оборудование и оснастка предприятий абразивной и алмазной промышленности» и «Технология обработки алмазами и абразивами». Это позволило сократить объем материалов, относящихся к описанию оборудования, схем его расстановки, эксплуатации инструментов и расширить изложение вопросов проектирования и технологии производства инструментов.

Авторы выражают большую благодарность специалистам, ознакомившимся с рукописью, за ценные советы и критические замечания, которые были учтены в процессе подготовки пособия к изданию.

Глава I. АБРАЗИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИХ СВОЙСТВА

Абразивными материалами называются вещества естественного и искусственного происхождения, обладающие высокой твердостью, прочностью и износостойкостью, частицы которых пригодны для обработки деталей царапанием и истиранием. К ним относятся: алмаз, корунд, наждак, кубический нитрид бора, карбид кремния, карбид бора и ряд других. Из абразивных материалов изготовляют порошки, которые используются для обработки как в свободном, так и в связанном состоянии в виде абразивного инструмента. Абразивными инструментами называются инструменты, состоящие из большого числа однородных по размеру зерен абразивных материалов, закрепленных связующими веществами (связкой). Абразивный инструмент можно рассматривать как режущий инструмент с очень большим числом режущих элементов (абразивных зерен), произвольно расположенных на рабочей поверхности. Поскольку в работе участвует одновременно большое число зерен, это обеспечивает высокую производительность процесса, а в связи с тем, что глубина царапин незначительна, при обработке абразивами могут быть достигнуты высокие точность и класс шероховатости поверхности.

Для успешного осуществления абразивной обработки необходимо, чтобы твердость абразивных зерен, из которых изготовлен инструмент, была выше твердости материала обрабатываемой заготовки.

Чем больше эта разница, тем эффективнее обработка. Поэтому алмаз, обладающий наивысшей твердостью из всех известных веществ, является самым эффективным материалом для абразивной обработки.

Абразивной обработке подвергаются все применяемые в технике как металлические, так и неметаллические материалы. Особенно широкое применение получила абразивная обработка черных и цветных металлов и сплавов на их основе, неметаллических материалов — стекла, кварца, рубина, керамики, строительных материалов — гранита, мрамора, бетона и др. В настоящее время трудно найти отрасли промышленности, где бы не применялась абразивная обработка.

§ 1. ПРИРОДНЫЕ АБРАЗИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

К числу используемых в промышленности природных абразивных материалов относятся корунд, наждак, гранат, кварц, кремень и имеющий особое значение для развития современной техники — природный алмаз.

Корунд представляет собой минерал, состоящий в основном из кристаллической окиси алюминия и некоторого количества примесей. Содержание тех или иных примесей определяет цвет корунда — бурый, розовый, синий, серый, белый и т. д. Все примеси в корунде являются менее твердыми и снижают его абразивную способность, которая характеризуется количеством снимаемого материала до разрушения зерен.

По чистоте, цвету, структуре и твердости корунды условно можно подразделить на две группы: прозрачные или благородные корунды и непрозрачные или обыкновенные корунды. К первой группе относятся драгоценные и полудрагоценные камни, такие как сапфир, рубин. Абразивные материалы изготовляют из корундов второй группы, отличающихся непрозрачностью и бо́льшим содержанием примесей.

Плотность корунда 3,93—4,1 г/см^3, твердость по шкале Мооса 9. Абразивная способность, определенная по методике ВНИИАШа, по сравнению с эталоном (монокорундом) в зависимости от содержания корунда в пробе находится в пределах от 55 до 95%. Корунд при обычных условиях химически инертен и негигроскопичен. При температуре примерно 1000° С он интенсивно взаимодействует с едкими и углекислыми щелочами, образуя алюминаты, которые легко растворяются в воде. Допустимое содержание двуокиси алюминия Al_2O_3, количества каждой примеси и потерь при прокаливании установлены действующими нормами.

Корунд применяют главным образом для изготовления паст (преимущественно полировальных) и шкурок.

Наждак представляет собой мелкозернистый материал черного или черно-серого цвета, состоящий из зерен корунда с примесью пирита, магнетита, хлоритоида, лимонита и ряда других минералов. В лучших сортах наждака содержится до 60% окиси алюминия; плотность наждака 3,45—3,5 г/см^3, твердость по шкале Мооса 7—8. До создания синтетических абразивных материалов наждак являлся основным материалом для изготовления шлифовальных кругов, а сейчас его используют для изготовления абразивных шкурок и кругов на магнезиальной связке, при полировании и притирке совместно работающих деталей.

Гранаты относятся к группе сложных силикатов; твердость их по шкале Мооса 6—7; плотность 3,54—4,25 г/см^3. Цвет граната определяется химическим составом. Зерна граната в процессе работы раскалываются по мере затупления, что обеспечивает самозатачивание инструмента. Абразивные порошки из граната используют для изготовления шлифовальных шкурок, применяемых для обработки дерева, кожи, стекла, пластмасс и других материалов. Для

эффективного применения граната в качестве абразива его содержание в породе должно быть не ниже 85—90%. Для обработки стекла пригодны сорта, содержащие 45—55% граната.

Кварц является одним из наиболее распространенных минералов. Он представляет собой безводную кристаллическую кремниевую кислоту SiO_2. Твердость кварца приближается к твердости наждака (по шкале Мооса 7), плотность его 2,4—2,7 г/см³. В зависимости от содержащихся примесей кварц имеет различную окраску и названия. Кварцевые материалы по виду делятся на три группы: кварцевый песок, жильный кварц и кварцит. Различают два сорта кварцевых материалов: содержащий не менее 99,5% SiO_2; содержащий не менее 98,5% SiO_2. Кварцевый песок должен быть почти белого цвета, прозрачный или матовый. В нем не должно быть заметных на глаз примесей слюды, черных зерен, пыли, каолина и окислов железа. Его обычно подвергают механическому и химическому обогащению. Зерна кварцевого песка имеют округлую форму. Кварцит и жильный кварц дробят и затем классифицируют. Кварц применяют, главным образом, в виде песка для шлифования и полирования стекла, фарфора и других материалов и для изготовления шлифовальной шкурки на тканевой или бумажной основах (ГОСТ 5009—68 и 6456—68).

Песчаники — особая разновидность кварцевых пород. Они состоят из кварцевых песков, сцементированных между собой. Размер зерен в преобладающей фракции песчаников различной зернистости составляет от 0,5—1,7 до 0,1—0,15 мм. В качестве абразивов можно применять все разновидности песчаников, если они имеют достаточную прочность, твердость и однородность структуры. Из песчаников вырезают блоки, которым придают требуемую форму инструмента в результате обработки резанием. Инструмент из песчаников в настоящее время применяют в основном в мелких производствах в качестве инструментов для скобяного товара.

Кремень является разновидностью халцедона и относится к скрытокристаллической модификации природного кремнезема. В нем имеются примеси глинистого и карбонатного вещества. По техническим требованиям в кремнии должно содержаться не менее 96% двуокиси кремния и не более 1% окиси. Кремень обладает большой вязкостью; его зерна имеют более острые кромки, чем кварц. Поэтому, имея примерно одинаковую твердость с кварцем, кремний является более эффективным абразивным материалом. Кремний может быть использован для изготовления шлифовальной шкурки на бумажной и тканевой основах, предназначенной для обработки дерева, кожи и ряда им подобных неметаллических материалов.

Из других природных абразивных материалов применяют известь и тальк, являющиеся мягкими и тонкими полирующими материалами и применяющимися в виде наполнителей в алмазных инструментах и пастах. Как абразивный материал иногда применяется пемза, являющаяся продуктом остывания поверхностных слоев лавы.

Алмаз — вещество, обладающее самой большой твердостью среди всех известных в природе и созданных человеком материалов.

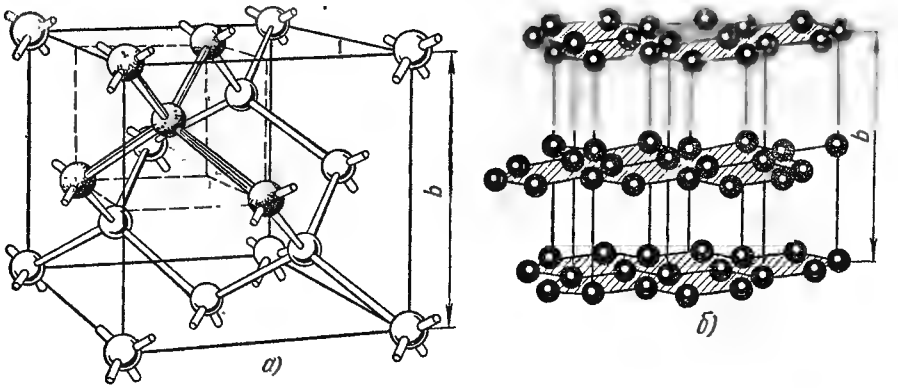


Рис. 1. Атомные структуры алмаза (*а*) и графита (*б*); *b* — постоянная решетки

Алмаз — одна из кристаллических модификаций углерода. Широко известна и другая модификация этого вещества — графит. Несмотря на полную тождественность химического состава графит и алмаз резко различаются по свойствам. Графит — очень мягкое вещество.

В противоположность ему блестящий, сверкающий, прозрачный алмаз режет стекло и все другие известные человеку наиболее прочные и твердые материалы и является наиболее твердым веществом на нашей планете.

Не только твердостью и цветом отличается графит от алмаза. Плотность графита более чем в 1,6 раза ниже, чем алмаза; графит является проводником электричества, а алмаз нет. Графит растворяется в некоторых кислотах, а на алмаз не действуют самые крепкие кислоты и даже смесь соляной и азотной кислоты, называемая «царской водкой».

Алмаз и графит являются кристаллическими веществами, и резкое различие их свойств объясняется различным расположением атомов углерода в структурных решетках (рис. 1). Графит представляет собой слоистую гексагональную (шестигранную) структурную решетку с расстоянием между слоями 3,39 Å(1 Å — ангстрем = $= 10^{-8}$ см = 0,0001 мкм). Атомы углерода в слое расположены по вершинам правильных шестиугольников. Центры шестиугольников остаются пустыми. Расстояние между атомами в слое равно 1,42 Å. Взаимная ориентировка слоев такова, что три вершины шестиугольника одного слоя расположены над центрами шестиугольника следующего слоя. Таким образом, полная вертикальная трансляция (повторяемость) равна удвоенному расстоянию между соседними слоями. В результате такого строения графита связи между атомами углерода в слое очень прочные, а между слоями, ввиду большого расстояния между ними, очень слабые, что приводит к легкому расслоению графита в этом направлении.

Алмаз имеет кубическую кристаллическую решетку, содержащую 18 атомов углерода, из которых 8 расположены в вершинах куба, 6 — в центрах граней куба и 4 — в центрах четырех из восьми кубов,

образованные делением элементарной кубической ячейки тремя взаимно перпендикулярными плоскостями. Сторона элементарной кубической решетки алмаза равна 3,567 Å, а кратчайшее расстояние между атомами составляет 1,54 Å. Чрезвычайно прочные связи между атомами в структуре алмаза обуславливают его исключительную твердость и другие характерные свойства.

Масса алмаза измеряется в метрических каратах. Один метрический карат равен 0,2 г. Масса природных алмазов варьирует от мелких кристаллов весом в сотые доли карата до крупных камней в сотни и тысячи каратов. Самый крупный в мире природный алмаз «Куллинан» весил 3106 карат.

Природные алмазы бывают бесцветные или окрашенные в разные цвета, различной интенсивности в зависимости от примесей. По окраске, форме и характеру кристаллической структуры алмазы делятся на ювелирные и технические. К ювелирным алмазам относятся кристаллы высокого качества, совершенной формы, исключительной прозрачности, хорошей и равномерной окраски, без трещин, включений и других дефектов. Эти алмазы подвергаются огранке и полировке, после чего они называются бриллиантами. К техническим алмазам относятся камни неопределенной формы и неопределенного цвета, которые непригодны для изготовления бриллиантов, из-за наличия дефектов (трещин, включений). Алмазы встречаются в природе в виде монокристаллов, сростков, агрегатов и осколков кристаллов.

Плотность алмазов 3,48—3,56 г/см³. По шкале твердости Мооса алмаз занимает наивысшее десятое место. Твердость алмаза по Кнупу (измеряется алмазной пирамидой с ромбическим основанием и углом при вершине между ребрами 130° и 172° 30′) равна 8000—8500 кгс/мм². Микротвердость алмаза по Виккерсу (измеряется алмазной пирамидой с углом между противоположными гранями 136°) равна 10 000 кгс/мм².

Главными разновидностями технических алмазов являются: борт, карбонадо и баллас. Алмазы борт представляют собой непрозрачные сростки мелких алмазных кристаллов неправильной формы, не имеющих определенных плоскостей спайности. Кристаллы этого сорта — преимущественно стального цвета с голубоватым и желтым оттенком обычно трещиноватые. Алмазы борт широко применяются в промышленности. Из них изготовляют алмазный абразивный инструмент, а также режущие, буровые и правящие инструменты.

Карбонадо представляют собой тонкозернистые агрегаты алмаза овальной формы, плотные (эмалевидные) или пористые (коксовидные и шлаковидные), состоящие из массы микроскопических кристаллов. Поверхность у них блестящая со смолистым оттенком, цвет черный, серый и зеленоватый. Плотность карбонадо: высокого качества — 3,45, низкого — 3,1 г/см³. Кристаллы карбонадо менее хрупки по сравнению с алмазами борт.

Балласы — шаровидные агрегаты алмаза, большей частью радиально-лучистого строения. По сравнению с бортом балласы проч-

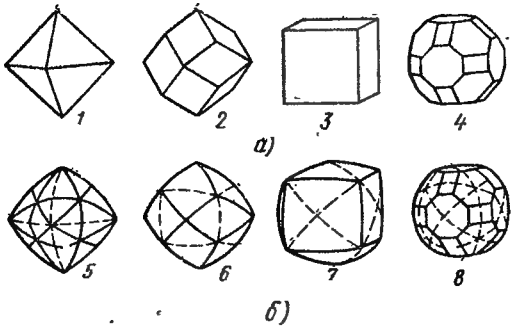


Рис. 2. Распространенные формы алмазов:

а — плоскогранные; *б* — кривогранные; *1*, *5* — октаэдр; *2* — ромбододекаэдр; *3* — куб; *4*, *8* — комбинации этих форм; *6* — додекаэдроид; *7* — гексаэдроид

нее, имеют более твердую оболочку, но менее твердое, крупнозернистое ядро. Алмазы баллас и карбонадо используют для изготовления бурового инструмента.

Алмаз обладает совершенной спайностью. При ударе он обычно легко раскалывается по плоскостям, параллельным граням октаэдра. По ромбододекаэдру он обладает менее совершенной спайностью. Баллас не имеет определенных плоскостей спайности. Карбонадо вообще не имеет спайности. Наличие спайности алмаза предопределяет его хрупкость. Излом у алмаза раковистый. Обычные формы алмаза (по И. И. Шафрановскому) приведены на рис. 2.

Наиболее ценным свойством алмаза, кроме его твердости, является высокий модуль упругости (90 000 кгс/мм^2), превосходящий модуль упругости всех известных в природе материалов.

Низкая адгезионная способность алмаза значительно облегчает сход стружки и уменьшает возможность образования нароста из обрабатываемого материала. Из-за высокой теплопроводности (коэффициент теплопроводности при 0° С равен 0,35 кал/см·с·град) алмаз обеспечивает лучший отвод тепла из зоны резания по сравнению с инструментом из других абразивов, твердых сплавов и быстрорежущих сталей. Коэффициент линейного расширения алмаза, равный $(0{,}9 \div 1{,}45)\ 10^{-6}\ \frac{1}{\text{град}}$, в несколько раз меньше, чем твердого сплава, и в 10 раз меньше, чем быстрорежущих сталей, что очень важно при обработке деталей с высокой точностью. Сочетание чрезвычайно низкого коэффициента сжатия алмазов с высокой режущей способностью частиц обеспечивает высокую эффективность резания. Коэффициент сжатия алмаза равен $(0{,}18 \div 0{,}23)\ 10^{-6}$ кгс/см^2, что в несколько раз меньше коэффициентов сжатия всех известных в природе веществ.

В связи с высокой твердостью и низким коэффициентом трения алмаза по металлу он обладает исключительной стойкостью на истирание, превышающей стойкость обычных абразивных материалов в сотни и тысячи раз. Алмаз диамагнитен, однако встречаются некоторые его разновидности, имеющие парамагнитные свойства, близкие к свойствам кварца. В отдельных кристаллах наблюдаются магнитные свойства, обусловленные включением магнетита, ильменита и других минералов, имеющих высокую магнитную проницаемость.

При продолжительном нагревании на воздухе алмаз сгорает при 850—1000° С и без доступа кислорода при температуре около 2000°С переходит в графит. Алмаз обладает исключительной химической стойкостью. Даже крепкие и нагретые до высоких температур кислоты и щелочи на алмаз не действуют. Это свойство алмаза используется при необходимости извлечения его из связки, которую растворяют в кислоте или щелочи, не взаимодействующих с алмазами.

Алмаз растворяется (вернее окисляется и сгорает) лишь в расплавленной натриевой или калиевой селитре или соде.

Алмазы добывают из россыпных и коренных месторождений. Впервые промышленные месторождения алмазов были открыты в Индии в III веке до нашей эры. В IV веке нашей эры большие залежи алмазов были обнаружены на острове Борнео, а в начале XVIII века в Бразилии. Бурный рост добычи алмазов начался после открытия богатейших коренных месторождений в Южной Африке (1867 г.) и в особенности в Конго (1907—1913 гг.). Наибольших размеров мировая добыча алмазов достигла в связи со все развивающимся применением алмазов в промышленности и ростом их потребления для ювелирных целей.

Первое место в капиталистическом мире среди поставщиков алмазов занимает Народная Республика Конго, второе — ЮАР, третье — республика Гана, далее идут республика Сьерра Леоне и Ангола. В последние десятилетия на долю Африки приходится около 96,5—98% всех добываемых в капиталистическом мире алмазов.

В России первые алмазы были найдены на Урале в 1826 г. В 1941 г. там же были открыты россыпные месторождения алмазов. В 1954 г. было открыто первое коренное месторождение — кимберлитовая трубка «Зарница» в Якутской АССР. В последующие годы там выявлена большая область распространения кимберлитов (породы, содержащей алмазы), что позволило организовать промышленную добычу алмазов. Наиболее промышленно выгодными являются коренные месторождения алмазов трубки «Мир», «Счастливая» и россыпные месторождения бассейна р. Вилюй.

С каждым годом добыча природных алмазов в мире продолжает расти. Однако их количество не может удовлетворить растущую потребность промышленности. Поэтому наряду с природными алмазами все большее значение для техники приобретают синтетические алмазы.

§ 2. ИСКУССТВЕННЫЕ АБРАЗИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Искусственные абразивные материалы по сравнению с природными обладают не только стабильностью свойств, но и более высоким качеством, что обусловило широкое применение их в промышленности.

Абразивная промышленность СССР производит следующие основные искусственные абразивные материалы: электрокорунд (нор-

мальный, белый, легированный и монокорунд), карбид кремния (зеленый и черный), карбид бора, борсиликокарбид. К искусственным абразивным материалам относятся также полировально-доводочные порошки — окись хрома и окись железа (крокус). Для изготовления шлифовальной шкурки используется бутылочное стекло. Особую группу искусственных абразивных материалов составляют синтетические алмазы и кубический нитрид бора.

Электрокорунд

Электрокорунд в качестве абразивного материала начали применять с 1901 года. Химически чистый корунд представляет собой кристаллическую окись алюминия, получаемую в результате плавки химически чистой окиси алюминия (глинозема) при температуре около 2050° С.

Электрокорунд выпускается обычно с содержанием 91—99% Al_2O_3. Начало размягчения при 1750° С, точка плавления 2040—2050° С; плотность 3,93—4,01 г/см^3; микротвердость 1800—2600 кгс/мм^2; твердость по шкале Мооса 8,9—9,1. По твердости корунд уступает только алмазу, кубическому нитриду бора, карбиду бора и карбиду кремния.

Промышленность выпускает следующие четыре разновидности электрокорунда, которые в зависимости от содержания двуокиси алюминия и примесей имеют различный цвет, структуру и свойства:

1) электрокорунд нормальный, содержащий в зерне 92—96% Al_2O_3 и имеющий цвет от розового до темно-коричневого (синий, коричневый, малиновый и др.);

2) электрокорунд белый, содержащий 97—99% Al_2O_3;

3) легированные электрокорунды, содержащие элементы, существенно изменяющие их свойства, например, титан, хром и др.;

4) монокорунды, содержащие 97—98% Al_2O_3.

Нормальный электрокорунд получают из бокситов методом восстановительной плавки в электропечах. По сравнению с другими электрокорундовыми материалами его наиболее часто применяют в народном хозяйстве. Плотность нормального электрокорунда составляет 3,9 г/см^3; микротвердость, определенная по методике ВНИИАШа, колеблется в пределах 2000—2300 кгс/мм^2.

Бокситы должны удовлетворять следующим требованиям: содержать не менее 50% Al_2O_3; иметь кремниевый модуль (отношение содержания Al_2O_3 к SiO_2) не меньше 10 (желательно 15—20); содержать не более 0,5% окиси кальция; кальциевый модуль (отношение содержания Al_2O_3 к CaO) должен быть не менее 125; не содержать такие примеси, как окись магния и серу; число кусков размером менее 10 мм не должно превышать 15%. Чем выше кремниевый и кальциевый модули бокситов, тем в электрокорунде больше содержится глинозема. Пылевидные бокситы перед плавкой спекают (агломерируют), что позволяет обеспечить необходимую газопроводность шихты и тем самым устранить выбросы расплавленной массы.

Возможность выделения глинозема из боксита основана на большем сродстве кислорода к алюминию по сравнению с другими металлами, окислы которых содержатся в бокените. При восстановительном процессе следует применять углеродистые материалы, главным образом малозольный антрацит. Обычно используют антрацит крупностью 3—5 мм; он должен содержать не более 5% влаги, 2% серы, 3,5% летучих веществ.

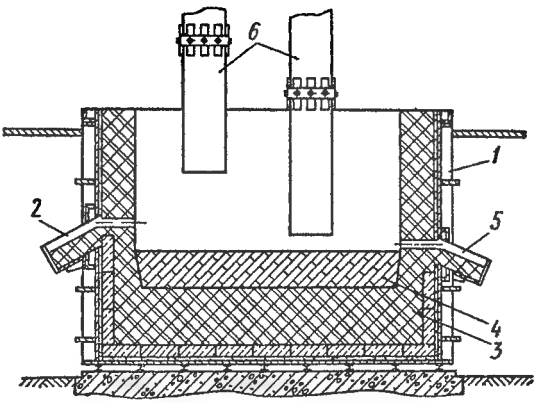


Рис. 3. Схема неподвижной печи для плавки электрокорунда на выпуск:

1 — кожух печи; *2* — летка для слива электрокорунда; *3* — футеровка из магнезитового кирпича; *4* — подина, наплавленная из электрокорунда; *5* — летка для слива ферросилиция; *6* — самоспекающиеся электроды

Нормальный электрокорунд выплавляют в открытых дуговых трехфазных электрических печах мощностью 4000—9500 кВА и выше. Процесс плавки осуществляется двумя методами: на блок и на выпуск. Они почти не отличаются от прочих металлургических процессов. Для блок-процесса используют стационарные и подвижные печи. Подвижные печи отличаются от стационарных тем, что они смонтированы на тележке. Для плавки на выпуск применяют только стационарные печи (рис. 3), которые отличаются от стационарных печей для блок-процесса тем, что снабжены двумя летками: верхняя служит для выпуска электрокорунда, нижняя — для выпуска ферросплава, образующегося при плавке.

Перед запуском печи на подготовленную подину устанавливают кожух, в который засыпают дробленый антрацит в количестве 1—1,5 т. Антрацит разравнивают в виде слоя с утолщением от центра к стенкам кожуха, образуя линзу, которая служит сборником ферросплава и предотвращает его выход из-под кожуха; затем насыпают боксит в количестве 4—6 т и разравнивают.

Блок нормального электрокорунда в подвижной печи получают за четыре этапа: розжиг печи, наплавление блока, проплавление колошника и доводка расплава до необходимого качества, охлаждение блока. Выплавка нормального электрокорунда в стационарной печи на выпуск через летку ведется непрерывно и осуществляется только в печах значительной мощности. В этом случае продукт плавки по мере наплавления сливают из печи в изложницы, где он кристаллизуется.

Выплавка электрокорунда на выпуск является перспективной. Главное ее преимущество заключается в возможности увеличения мощности печей; себестоимость электрокорунда, выплавленного на выпуск, значительно ниже себестоимости электрокорунда, выплав-

ленного на блок. При этом процессе достигается лучшее разделение расплава на электрокорунд и ферросплав. При автоматизации выплавки электрокорунда на выпуск себестоимость его снизится еще больше.

В процессе плавки сопутствующие глинозему в боксите окислы железа, кремния и титана восстанавливаются до металлов; образуется ферросплав сложного состава, который при рафинировании расплава осаждается на под печи, а глинозем переходит в корунд (α-глинозем или α—Al_2O_3). Для обеспечения требуемых магнитных свойств ферросплава и его утяжеления (увеличения плотности) в шихту добавляют железную стружку. Ферросплав должен быть магнитным и полностью извлечен из электрокорунда при дроблении и магнитной сепарации. На изготовление 1 т электрокорунда затрачивается электроэнергия 2500—3000 кВт·ч и более, в зависимости от качества боксита, мощности печи, требуемого качества электрокорунда и режима плавки.

Качество синтезированного абразивного материала определяется составом, правильностью формы кристаллов, их изометричностью и размерами, что, в свою очередь, зависит от условий кристаллизации. Чем выше содержание Al_2O_3 в продукте, тем корунд имеет меньше примесей и тем крупнее его кристаллы, размер которых составляет, как правило, не менее 0,6—0,8 мм. Электрокорунд, кроме корунда, содержит другие компоненты, такие как гексаалюминат кальция, муллит и другие, снижающие его абразивную способность.

Высокая твердость и прочность зерен позволяют использовать электрокорунд для шлифования металлов. Кроме того, корунд имеет значительную вязкость, а поэтому его применяют при выполнении работ с переменными нагрузками и при повышенных давлениях. С увеличением содержания Al_2O_3 область применения нормального электрокорунда расширяется. Но вследствие высокой стоимости такого электрокорунда его следует применять тогда, когда это экономически и технически оправдано.

Промышленность выпускает нормальный электрокорунд марок 12А, 13А, 14А, 15А и 16А. Электрокорунд 12А и 13А применяют при изготовлении инструментов на органической связке, предназначенных для обработки заготовок из углеродистых незакаленных сталей и легированных чугунов. Электрокорунд 14А используют при изготовлении абразивных паст и инструментов на всех связках, которые применяют для обработки заготовок из незакаленных сталей, легированных чугунов и цветных металлов. Из электрокорунда 15А изготовляют инструменты на всех связках, применяемых для обработки заготовок из конструкционных углеродистых и легированных сталей.

Белый электрокорунд отличается высоким содержанием окиси алюминия (около 99%) при незначительном наличии других окислов (Na_2O, K_2O, CaO, Fe_2O_3, SiO_2). Микротвердость белого электрокорунда 2200—2600 кгс/мм^2, плотность 3,95 г/см^3.

Вследствие высокой твердости, прочности и наличия острых кромок зерна белого электрокорунда легко внедряются в заготовки из

высокопрочных сплавов. Острые кромки зерен способствуют также меньшему нагреву обрабатываемых заготовок.

Химический состав белого электрокорунда, производимого на разных заводах, отличается содержанием примесей и зависит от качества исходного сырья, устройства электрических печей и других факторов. Сырьем для выплавки белого электрокорунда является глинозем, представляющий собой окись алюминия (γ—Al_2O_3) с незначительным количеством примесей. Его получают из бокситов, нефелинов, каолинов и других продуктов. Гамма-глинозем является безводной окисью алюминия, его плотность 3,77 г/см^3; он обладает большой дисперностью и гигроскопичностью.

Для производства белого электрокорунда применяют глинозем ГЭБ, в котором содержится не более 0,2% кремния, 0,06% окиси железа и 0,3% окислов щелочных металлов в пересчете на окись натрия. Он имеет определенный гранулометрический состав, так как повышенное содержание в глиноземе мелких фракций отрицательно сказывается на технико-экономических показателях плавки.

При производстве белого электрокорунда γ-глинозем переходит в α-глинозем с достаточной кристаллизацией корунда. Равновесие наступает при температуре 900° С (по расчету); при дальнейшем повышении температуры должна преобладать фаза корунда. Белый корунд плавят в дуговых трехфазных электропечах, устройство которых аналогично печам, применяемым для производства нормального электрокорунда. С целью снижения потерь глинозема и улучшения условий труда кожух охлаждают водой. В своде печи имеются отверстия для подачи глинозема, ввода электродов, отвода газов и пыли, а также окна для наблюдения и для разравнивания глинозема на колошнике. В связи с тем, что плавка на выпуск имеет ряд существенных преимуществ перед блок-процессом, выплавка белого электрокорунда на блок не производится.

Для улучшения микроструктуры электрокорундовых материалов применяют вторичный электрический подогрев расплава в изложнице-печи. Подогрев расплава позволяет создать особые тепловые условия его кристаллизации, препятствующие образованию усадочной раковины и дефектному росту кристаллов, а также обеспечивающие однородность продукта по всему объему слитка. Расход электроэнергии при подогреве составляет 100 кВт·ч на 1 т электрокорунда. По окончании подогрева изложница-печь остывает в течение 30 мин на месте, а затем ее перевозят на специальную площадку, где она остывает в течение 4,5 ч. Слиток освобождают от кожуха, и он остывает в течение двух суток. В конце цикла охлаждения слиток поливают водой и он растрескивается и рассыпается. Крупные куски дробят на копре. Затем сырье сортируют и продукт, пригодный для дробления на порошки, передают на следующие операции.

Абразивные инструменты и материалы из белого электрокорунда однородны и обладают хорошей самозатачиваемостью, а обработанные ими поверхности деталей отличаются низкой шероховатостью. Благодаря этим качествам из белого электрокорунда изготовляют

абразивные инструменты, применяемые при прецизионном и скоростном шлифовании. Белый электрокорунд выпускают трех марок: 23А; 24А и 25А. Из регенерируемого зерна изготовляют белый электрокорунд марки 22А.

Из белого электрокорунда 23А и 22А изготовляют шлифзерно, шлифпорошки и микропорошки, применяемые при производстве шкурок, паст и абразивных инструментов для обработки заготовок из углеродистых, легированных и быстрорежущих сталей. Из абразивных порошков 24А и 25А изготовляют прецизионные инструменты класса А на всех связках, предназначенные для обработки заготовок из углеродистых, быстрорежущих и легированных сталей.

Легированные электрокорунды обладают регулируемыми свойствами вследствие того, что в корунде содержатся различные элементы, образующие с ним твердые растворы. Свойства легированных корундов отличаются от обычных. Технология выплавки электрокорундов из глинозема с добавками легирующих веществ (окислов некоторых металлов, например Ti, Cr, Co и др.) разработана В. В. Карлиным и Н. Е. Филоненко. Наиболее известны легированные электрокорунды титанистый и хромистый.

Материал, выплавленный из глинозема с полуторной окисью титана, называется титанистым электрокорундом. Абразивная способность титанистого электрокорунда выше, чем нормального и белого электрокорунда при меньшей прочности и микротвердости.

Титанистый электрокорунд можно выплавлять в электропечах, применяемых для плавки белого электрокорунда при тех же электрических параметрах, а также в трехфазных дуговых электропечах. При плавке используют следующие шихтовые материалы: глинозем, двуокись титана, антрацит. При изготовлении абразивных инструментов из титанистого электрокорунда необходимо учитывать, что твердый расплав в корунде при отжиге на воздухе (около 1100° С) распадается, и окись титана переходит в двуокись.

Хромистый электрокорунд марок 32А, 33А и 34А получают из глинозема при выплавке с добавкой окиси хрома. Небольшая добавка окиси хрома (0,3—0,5%) изменяет микроструктуру электрокорунда и улучшает его строение, так как монокристаллов в хромистом электрокорунде больше, чем в белом. С увеличением количества растворенной в корунде окиси хрома прочность зерен уменьшается, а абразивная способность возрастает. По показателям абразивной способности, прочности и микротвердости хромистый и белый электрокорунды примерно одинаковы. Твердый раствор хрома в корунде более устойчив, чем твердый раствор титана.

Круги из легированных электрокорундов рекомендуется применять для шлифования заготовок из конструкционных и инструментальных (закаленных) сталей. Использовать инструменты из легированных электрокорундов для обработки заготовок из вязких сталей нецелесообразно. Удельная производительность кругов из легированных электрокорундов при шлифовании заготовок из труднообрабатываемых материалов в 1,5—2 раза выше, чем кругов из белого электрокорунда, а износ на 10—30% ниже.

Более высокие производительность, ударная вязкость, самозатачиваемость и другие свойства абразивных инструментов из легированных электрокорундов по сравнению с белым и нормальным электрокорундами, по-видимому, объясняются изменением макро- и микроструктуры при введении легирующих добавок, однородностью легированных электрокорундов (химической, физико-механической, кристаллической), лучшими минералогическим составом и геометричностью зерен порошков, особым взаимодействием с керамическими связками (преимущественно титанистого электрокорунда).

Монокорунд отличается от других электрокорундов большой чистотой, причем почти вся окись алюминия в монокорунде представлена корундом с зернами-монокристаллами. Монокорунд содержит не менее 97% Al_2O_3, остальное примеси (SiO_2, Fe_2O_3, TiO_2, CaO); плотность 3,97 г/см^3.

Монокорунд получают из бокситов методом оксисульфидной плавки, сущность которой заключается в сплавлении боксита с сернистым железом (пиритом) в присутствии восстановителя. Боксит для производства монокорунда может содержать до 2% CaO, что является преимуществом процесса производства этого вида электрокорунда, позволяющим использовать кальциевые бокситы. Плавка монокорунда осуществляется в открытых дуговых электрических печах путем наплавления блока оксисульфидного шлака или с выпуском расплава через летку в изложницы. Оксисульфидный шлак состоит из зерен корунда, сцементированных сульфидами алюминия, кальция, железа и титана. При последующей обработке кусков блока (шлака) горячей водой зерна монокорунда освобождаются от сульфидов алюминия и кальция без дробления и затем подвергаются обогащению (удаление посторонних примесей). Полученное после обогащения зерно монокорунда прокаливают во вращающейся печи, подвергают контрольной магнитной сепарации и классифицируют по номерам зернистости.

Основная особенность производства монокорунда, технология которого разработана во ВНИИАШе М. В. Каменцевым, заключается в том, что он получается не в виде технической породы, подлежащей дроблению, а непосредственно в виде зерна, состоящего из изометричных кристаллов различной величины. По сравнению с нормальным и белым электрокорундами монокорунд обладает более высокими показателями: твердостью, механической прочностью и абразивной способностью. Изометричная форма зерен монокорунда и прочные острые кромки обеспечивают инструментам высокую режущую способность и хорошую самозатачиваемость.

Марки монокорунда 43А, 44А и 45А отличаются различным содержанием Al_2O_3 и применяются для изготовления инструментов на керамической связке и шлифовальной шкурки, предназначенных для обработки заготовок из закаленных легированных, жаропрочных и кислотоупорных сталей и сплавов.

В стандарте ОСТ 2-115—71 «Материалы абразивные в зерне. Электрокорунд» регламентированы марки электрокорундовых мате-

риалов и установлены технические требования к ним. Новое обозначение марок принято в соответствии с рекомендациями СЭВ и ИСО.

Карбид кремния

Карбид кремния (SiC) является продуктом химического соединения углерода с кремнием при высокой температуре. В нем содержится 70,04% Si и 29,96% C. Молекулярный вес карбида кремния составляет 40,09, плотность 3,1—3,2 г/см^3, микротвердость 3000—3300 кгс/мм^2, твердость по шкале Мооса более 9. Химически чистый карбид кремния бесцветен, а технический окрашен в различные цвета от черного до зеленого и отличается металлическим блеском и цветами побежалости.

Карбид кремния является химически стойким веществом, так как на его поверхности при окислении образуется пленка двуокиси кремния, защищающая материал от взаимодействия с серной, азотной и плавиковой кислотами. На воздухе карбид кремния очень медленно окисляется при нагреве до 800° С и активно — при 1000—1400° С. При взаимодействии карбида кремния с расплавленными щелочами, углекислыми солями и окислами (CuO, Fe_2O_3, MnO, Cr_2O_3) он разлагается при температуре 800—1390° С.

Производство карбида кремния является более энергоемким (8000—10 000 кВт-ч на 1 т карбида), трудоемким и материалоемким процессом по сравнению с производством электрокорунда. На производство зеленого карбида кремния электроэнергии расходуется примерно на 20% больше, чем на производство черного карбида кремния. Карбид кремния получают восстановлением кремнезема углеродистым материалом с добавлением некоторого количества веществ, способствующих протеканию реакции

$$SiO_2 + 3C \rightarrow SiC + 2CO.$$

Химическая реакция сопровождается перестройкой одной структуры в другую. Промышленно ценный продукт карбида кремния образуется при температуре выше 1800° С. Он представляет собой промышленную породу, состоящую из карбида кремния SiC с незначительными примесями в виде графита, кварца, кремния, ферросилиция и др. С увеличением содержания SiC возрастает твердость карбида кремния. Наиболее вредной примесью является свободный углерод, так как он в большей степени понижает абразивную способность карбида кремния и вследствие плохой смачиваемости ухудшает скрепление зерен со связкой. Минеральный состав карбида кремния почти не отличается от химического.

Основным сырьем для производства карбида кремния являются кремнесодержащие материалы (кварцевые пески, кварциты, жильный кварц), углеродистый восстановитель (антрацит марки АП, нефтяной кокс), вспомогательные материалы (поваренная соль, древесные опилки, семечковая лузга) и возвратные материалы (керн, аморф, шихта и др.). В кремнесодержащих материалах

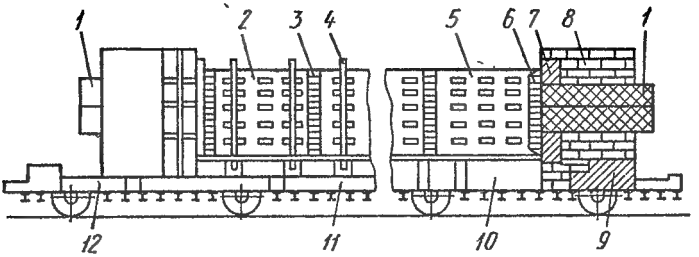


Рис. 4. Самоходная печь для производства карбида кремния:

1 — токоподводящие электроды; *2* — боковой щит передней стенки; *3* — кирпичная кладка; *4* — стойка для закрепления боковых щитов; *5* — боковой щит задней стенки; *6* — контактный материал из графитированных отсевов; *7* — защитные электроды; *8* — торцовая стенка из огнеупорного кирпича; *9* — бетонный корпус торца; *10* и *12* — концевые тележки; *11* — средняя тележка

должно быть не менее 98,5% SiO_2. Антрацит должен быть крупностью около 3 мм и содержать не более 3% золы, 5% влаги и 3,5% летучих веществ. Нефтяной кокс для шихты должен быть крупностью около 3 мм (для керна — 50+15 мм) и содержать не более 0,5% золы, 0,3% влаги и 7% летучих веществ. Вместо кокса лучше применять антрацит, так как он обладает большей объемной массой.

При производстве зеленого карбида кремния в шихту вводят до 6—7% поваренной соли. Она способствует удалению примесей в виде хлоридов из зоны реакции и, кроме того, выполняет функцию перераспределения температуры по зонам печи (из внутренних зон в наружные) путем шунтирования тока и испарения соли. В этом случае производительность печи выше, а расход электроэнергии на производство 1 т продукта ниже. Древесные опилки (или семечковую лузгу) применяют для увеличения пористости шихты (газопроницаемости); влажность опилок допускается не более 20%.

Для производства карбида кремния используют электрические печи сопротивления особой конструкции. Наиболее совершенной конструкцией являются самоходные печи (рис. 4), обеспечивающие высокую производительность. Основанием печи служит платформа, сваренная из швеллеров, на которую установлен каркас из чугунных колосников, образующих подину. Подину выстилают шамотным кирпичом; по краям ее устанавливают по шесть чугунных щитов (изолированных между собой шамотным кирпичом), образующих боковые стенки печи. В торцовых стенках монтируют пакеты электродов, подводящих в печь электрический ток. Со стороны рабочего пространства печи торец футеруют теплоизоляционными угольными блоками, поверхность которых обмазывают графитовой пастой. К наружной выступающей части электродов прикреплено контактное устройство. Ходовое устройство печи смонтировано на передней части платформы. Основные операции производства карбида кремния: подготовка шихты, подготовка и загрузка печи, пребывание печи под током, охлаждение и разборка печи, сортировка карбида кремния.

Сырьевые материалы дробят до размеров, предусматриваемых технологическим процессом, и загружают в бункеры, из которых их добавляют в шихту. В шихту вводят также аморфный карбид кремния и использованную (старую) шихту. Аморфный карбид кремния, содержащий до 85% SiC, является мелкокристаллическим продуктом. Он образуется в зоне печи, имеющей недостаточную температуру для образования товарного карбида кремния. Шихта увлажняется, тщательно перемешивается и передается в загрузочные бункеры печей. Шихта загружается из бункера в подготовленную печь при помощи загрузочных устройств и ленточного транспортера. Сначала на под печи насыпают слой теплоизоляционной шихты, а затем на нее загружают реакционную шихту, в которую закладывают слой аморфа. Аморф является центром кристаллизации образующегося карбида кремния. По центру печи при помощи деревянных щитов укладывают керновый материал, состоящий из углеродистых материалов. На керн загружают реакционную шихту и слой наполнительной теплоизоляционной шихты.

Карбид кремния выплавляют в плавильном отделении, куда загруженную печь перемещают для подключения к питающему трансформатору. Под действием электрического тока, поступающего через токопроводящие угольные электроды, материалы, образующие керн, нагреваются до 2400—2650° С и отдают теплоту шихте. По мере нагрева шихты из нее удаляется влага, окись углерода и летучие вещества. Для предотвращения хлопков и взрывов окись углерода поджигают. При достижении температуры 1450—1500° С образуется карбид кремния. При температуре около 1850° С кубическая модификация карбида кремния переходит в гексагональную, при которой он получает большую плотность. Так как процесс роста кристаллов и их уплотнение продолжается с возрастанием температуры, ее повышают до 2500—2550° С. После отключения печь отвозят из печного гнезда и устанавливают на площадку, где она остывает. Затем производится разборка печи. Полученные продукты сортируют и передают на последующую обработку: дробление, обогащение и т. д.

При синтезе карбид кремния кристаллизуется главным образом в виде тонких шестиугольных пластинок (гексагональная система). Он обладает большой теплопроводностью и сравнительно малой теплоемкостью. Коэффициент линейного расширения карбида кремния весьма низок и уменьшается с повышением температуры; диссоциация его на кремний и графит происходит при 2700° С.

Вследствие высокой твердости (превосходящей твердость корунда), прочности и режущим свойствам карбид кремния применяют в металлообрабатывающей промышленности. Инструменты из карбида кремния эффективно обрабатывают материалы с более низким пределом прочности на разрыв, в частности, латунь, цинк, бронзу, чугун, твердые сплавы, а также алюминий, камень, стекло, эбонит и другие хрупкие, не дающие сплошной стружки материалы.

Зеленый карбид кремния более хрупок по сравнению с черным карбидом кремния, отличается от него структурным составом и

обладает более высокой абразивной способностью (примерно на 10—15% выше). Зерна карбида кремния более плоские, чем зерна других абразивных материалов, и имеют прямолинейные кромки; среди дефектных зерен преобладают пластинчатые. При повышении количества дефектных зерен с 5 до 15% абразивная способность карбида кремния снижается на 20%. В зависимости от количества основного материала имеются различные марки зеленого карбида кремния: 62С, 63С и 64С. Из зеленого карбида кремния изготовляют абразивные порошки, которые используют в свободном состоянии для обработки оптического стекла, керамики, кварца и им подобных хрупких материалов, а в связанном — для заточки инструмента, в том числе твердосплавного, шлифования заготовок из некоторых видов закаленных сталей, неметаллических материалов и т. п.

Черный карбид кремния выпускают марок 53С, 54С и 55С. Качество и стойкость этого материала несколько ниже по сравнению с зеленым карбидом кремния. Черный карбид кремния применяют в виде свободных порошков, кругов на керамической и органических связках для обработки заготовок из чугуна, стекла, цветных металлов, кожи, резины, твердого сплава, пластмасс и т. п.

Высокая прочность, теплостойкость и химическая инертность карбида кремния обеспечили возможность изготовления из него жаростойких плит, нагревателей, износостойких деталей, термоизоляции и т. д.

Во ВНИИАШе на основе карбида кремния создан новый материал С-8, который представляет собой твердый раствор карбида кремния, сцементированный эвтектикой из карбида кремния и карбида бора. Этот материал обладает высокой прочностью, износостойкостью и термостойкостью. Разновидностью карбида кремния является пена из карбида кремния, которая обладает низкой теплопроводностью и может служить теплоизоляцией при температуре до 2200° С. В отраслевом стандарте ОСТ 2-114—71 «Материалы абразивные в зерне. Карбид кремния» регламентированы марки карбидкремниевых материалов и технические требования к ним. Установлены перспективные марки: 55С для черного карбида кремния и 64С для зеленого карбида кремния.

Карбид бора

В Советском Союзе промышленный выпуск карбида бора был освоен в 1943 г. Ленинградским абразивным заводом «Ильич». Он представляет собой химическое соединение B_4C, имеющее ромбоэдрическую кристаллическую решетку с параметрами: $a = 5{,}60$ Å, $c = 12{,}1$ Å. Плотность карбида бора 2,48—2,52 г/см^3, твердость по шкале Мооса более 9, микротвердость 3700—4300 кгс/мм^2. Карбид бора обладает высокой абразивной способностью, износостойкостью и химической стойкостью. Выпускаемый промышленностью карбид бора содержит 87—94% B_4C и до 78% элементарного бора (ГОСТ 5744—62).

Карбид бора не подвергается воздействию таких кислот, ка серная, плавиковая и азотная, его можно перевести в раствор, ес предварительно сплавить с содой или поташем в присутствии азо нокислого натрия. При температуре 700—750° С карбид бора легк окисляется кислородом.

Карбид бора получают путем плавки шихты, состоящей из тех нической борной кислоты (B_2O_3) и малозольного углеродистого материала, в дуговых электрических печах большой мощност Восстановление борного ангидрида углеродом происходит при тем пературе 1800—2500° С по следующей реакции:

$$2B_2O_3 + 7C = B_4C + 6CO.$$

Для выплавки карбида бора применяют однофазные и трех фазные дуговые разъемные электрические печи мощностью соот ветственно 450 и 1000 кВт, напряжением около 115 В, силой ток 4000—4500 А. Продолжительность плавки составляет 4,5—5,5 ч.

После подготовки шихтовых компонентов (борную кислот протирают через сито с размером ячеек 500—600 мкм, нефтяной кокс дробят до 1 мм) борную кислоту и нефтяной кокс взвешивают, перемешивают и спрессовывают в небольшие брикеты. Затем шихту направляют в печь, куда подают возвратный материал — спек. Карбид бора выплавляют за три периода: розжиг печи, наплавление блока и проплавление шихты на колошнике. Когда наплавление блока заканчивается, поднимают электроды и печь перемещают на площадку для остывания, где снимают с полученного блока металлический кожух. Затем с блока удаляют непрореагировавшую шихту-спек. Далее блок перевозят на специальную площадку. На площадке блоки остывают в течение 8—10 ч, а затем поступают на очистку, дробление, сортировку, химическое обогащение (удаление свободного углерода и графита) и классификацию. Промышленность выпускает карбид бора зернистостью № 12—М5.

Карбид бора при сортировке разделяют на три сорта: сорт I — мелкокристаллический, сорт II — переходной и сорт III — крупнокристаллический. Сортность карбида бора устанавливают в соответствии с утвержденными эталонными образцами в зависимости от цвета и характера кристаллизации. Полученный мелкокристаллический материал дробят, промывают и классифицируют. После дробления карбида бора получаются в основном изометричные зерна с острыми кромками. Окраска их черная, реже дымчатая или серая. Более крупные зерна всегда состоят из сростков нескольких кристаллов. Эти сростки непрочные и при работе распадаются на отдельные кристаллы и их части.

По твердости и абразивной способности карбид бора превосходит все другие абразивные материалы за исключением алмаза и кубического нитрида бора. Зерна карбида бора отличаются хрупкостью (его предел прочности при сжатии равен 180 кгс/мм^2) и легко раскалываются с образованием новых острых кромок, а поэтому дольше сохраняют режущую способность. Эти свойства предопределяют применение карбида бора для шлифования, доводки и обра-

бования отверстий в различных заготовках из твердых сплавов и камней (рубина, агата, топаза и др.).

Карбид бора применяют в основном для приготовления паст и суспензий при шлифовании и полировании заготовок из твердых материалов. Вследствие низкой температуры разложения при нагреве на воздухе (400—500° С) карбид бора в связанном состоянии в инструментах применяют редко, а используют для обработки в виде порошков с размером зерен не выше 100—120 мкм. Из карбида бора изготовляют огнеупоры, так как он устойчив к некоторым расплавленным металлам (к хрому при 1790° С, к меди при 2300° С), термопары и т. д. Карбид бора используют для правки абразивных кругов. При изготовлении алмазных инструментов и паст порошки карбида бора применяют в качестве наполнителя.

Синтетические алмазы

Алмазы, полученные искусственным путем, принято называть синтетическими, а не искусственными, так как они по своим свойствам ничем не отличаются от природных. Разница заключается в том, что природные алмазы получаются в недрах земли слепыми силами природы, а синтетические — человеком, познавшим законы их образования.

По химическим и физическим свойствам природные и синтетические алмазы в основном одинаковы. Имеются лишь небольшие различия по прочности, форме, размеру и характеру поверхности частиц, а также по термической стойкости, т. е. степени окисления при нагреве в воздушной среде.

Алмаз и графит по химическому составу представляют собой чистый углерод и являются всего навсего разными его модификациями, отличающимися расположением атомов в структурной решетке. Но к этому открытию ученые пришли не сразу, очень уж парадоксальной казалась им сама мысль о тождественности химического состава алмаза и графита — что, казалось, может быть общего между этими двумя материалами, скорее с диаметрально противоположными, чем сходными свойствами.

Над проблемой синтеза алмазов работало несколько поколений ученых многих стран. Понадобилось более полутора столетий от первых опытов Лавуазье и Теннана по определению химической природы алмаза до практического осуществления синтеза алмаза на основе точных знаний условий его образования. В настоящее время известны три метода синтеза алмаза.

1. Синтез в области термодинамической стабильности алмаза воздействием на исходный углеродсодержащий материал высоким статическим давлением и высокой температурой в течение времени, измеряемого не менее чем несколькими секундами.

2. Синтез в области термодинамической стабильности алмаза воздействием на исходный углеродсодержащий материал высоким динамическим давлением и высокой температурой в течение времени, измеряемого микросекундами и долями микросекунд.

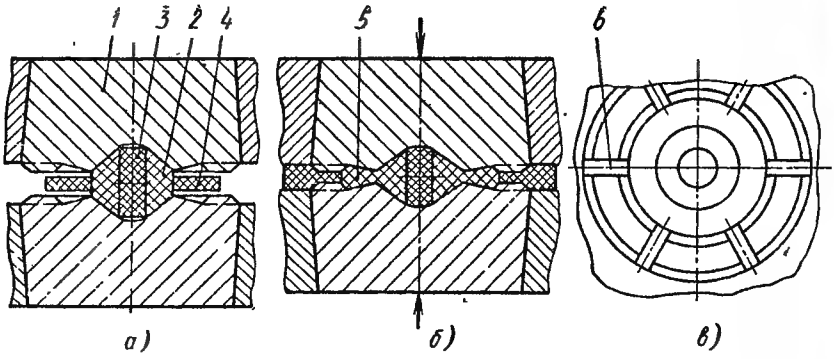


Рис. 5. Схема камеры высокого давления:

а — разрез камеры до приложении снлы; *б* — то же, после приложения силы; *в* — вид сверху на нижнюю матрицу; *1* — матрица; *2* — контейнер из литографского камня; *3* — реакционная смесь; *4* — муфта; *5* — заусенец; *6* — паз

3. Синтез в области термодинамической стабильности графита, осуществляемый при атмосферном и меньшем давлениях и высокой температуре путем физико-химического (эпитаксиального) наращивания алмаза на затравках.

Теория синтеза алмаза по первому методу впервые разработана советским ученым — проф. О. И. Лейпунским. Сформулированное им рациональное сочетание трех необходимых условий синтеза алмаза (температура, давление, среда) лежит в основе современных методов производства синтетических алмазов. В Советском Союзе алмаз был впервые синтезирован в лабораторных условиях Институтом физики высоких давлений АН СССР в 1960 г. под руководством академика Л. Ф. Верещагина. Технология промышленного производства синтетических алмазов была разработана Институтом сверхтвердых материалов. С 1961 г. началось ее промышленное внедрение. Для производства алмазов был проведен большой комплекс научно-исследовательских и экспериментальных работ, определены оптимальные параметры синтеза, подобрано наиболее эффективное сырье, созданы специальная оснастка и высокопроизводительные установки различной мощности по переработке графита в самый твердый минерал — алмаз.

Промышленный синтез алмазов в настоящее время осуществляется в специальных камерах (рис. 5) при давлении $(50—10)\cdot 10^3$ кгс/см^2 и температуре до 2500 ° С. Время синтеза колеблется от десятков секунд до нескольких часов. Синтез производят в присутствии металлов — растворителей (например, никеля, марганца, железа и целого ряда других материалов, различных соединений и сплавов) на специальных полуавтоматических установках, создающих усилие прессования 500—2000 тс и более.

Производство алмазов по второму методу (с применением высоких динамических давлений) в настоящее время также вышло из стадии лабораторных исследований и получило промышленное применение. При этом методе графит переходит в алмаз под действием

ударной взрывной волны, которая создает необходимые высокое давление и температуру, достаточные для перехода графита в алмаз.

Если при синтезе по первому методу (при статическом приложении нагрузки) время синтеза может задаваться в широких пределах (от нескольких секунд до нескольких часов и более), то при синтезе по второму методу процесс завершается за очень короткий промежуток времени, измеряемый микросекундами и их долями, что ограничивает размеры кристаллов алмаза, которые не превышают нескольких микрометров. Поэтому по второму методу можно изготовлять только микропорошки мелких размеров.

Как показали исследования, синтез алмаза оказался возможным даже в области термодинамической стабильности графита, т. е. в условиях, где графит является более устойчивой фазой, чем алмаз. Этот, третий, метод синтеза алмазов, который может осуществляться при атмосферном и меньшем давлениях и температуре 1100—1200° С, требует обязательного присутствия затравки алмаза (подложки).

Эксперименты показали, что если алмаз поместить в среду, в которой концентрация атомов углерода в виде пара или химически связанных атомов (например, в метане или ацетилене) превышает соответствующую равновесную, то избыточные атомы углерода могут выделяться на гранях подложки. Эти атомы будут находиться под влиянием силового поля кристаллической решетки алмаза, стремящейся продолжить «кладку» новых атомов с сохранением своей структуры. Таким образом, подложка предопределяет расположение новых атомов углерода в порядке, предписанном структурной решеткой алмаза. Такой процесс получения алмаза называется эпитаксиальным.

В Советском Союзе эпитаксиальное наращивание алмазных порошков и пленок, а также получение нитевидных и изометричных кристаллов алмаза из газа впервые было осуществлено по методу, разработанному в Институте физической химии АН СССР под руководством члена-корреспондента АН СССР Дерягина Б. В. Разработка различных установок и вариантов промышленной технологии эпитаксиального синтеза алмазов успешно ведется совместными усилиями двух коллективов — Института сверхтвердых материалов и Института физической химии.

По первому методу синтеза освоено производство семи марок порошков из синтетических алмазов: шлифпорошки — АСО, АСР, АСВ, АСК и АСС, отличающиеся друг от друга прочностью, хрупкостью и величиной удельной поверхности, и микропорошки — АСМ — обычной абразивной способности и АСН — повышенной абразивной способности. Каждая марка имеет рациональные области применения.

Алмазы АСО синтезируются при режиме, обеспечивающем необходимую наперед заданную хрупкость, прочность и развитую режущую поверхность. Они предназначаются для изготовления алмазно-абразивного инструмента только на органической связке, применяемого при чистовых и доводочных операциях. По сравнению

с природными алмазами прочность алмазов АСО в зависимости от их зернистости в 2—5 раз меньше, а удельная поверхность в 3 раз больше. Их повышенная хрупкость и пониженная прочность уж при незначительном затуплении зерна приводит к образовани новых режущих кромок, т. е. к самозатачиванию, что обуславливае минимальные силы резания и как следствие низкую температур шлифования. В то же время зерно хорошо удерживается в орган ческой связке, что способствует максимальному использованию е в работе. Такие особенности алмазов АСО обеспечивают высоко качество обработанной ими поверхности с минимальной глубино дефектного слоя при наименьшем удельном расходе алмаза. Именн поэтому при доводочных операциях алмазы АСО в инструмента на органической связке обладают в 1,5—2 раза большей работоспо собностью, чем природные алмазы и алмазы АСВ, АСК и АСС.

Алмазы АСР прочнее алмазов АСО примерно в 1,6—2 раза, но менее хрупкие. Они предназначаются для изготовления инструментов на керамических и металлических связках, которые применяются при шлифовании деталей из твердых сплавов, керамики стекла и других хрупких материалов.

Алмазы АСВ обладают еще большей прочностью и меньшей хрупкостью. Они используются для изготовления инструмента на твердых металлических связках, работающего при повышенных нагрузках.

Алмазы АСК по своей хрупкости и прочности идентичны природным алмазам. Они используются для изготовления инструмента на твердых металлических связках, применяемого в особо тяжелых условиях, в том числе при резке и обработке природного камня и железобетона.

Алмазы АСС обладают минимальной хрупкостью и наивысшей прочностью по сравнению со всеми марками синтетических алмазов и почти вдвое превосходят по прочности природные алмазы. Они рекомендуются для изготовления бурового инструмента, правки абразивных кругов, резки корунда и природного алмаза. Алмазы этой марки обязательно разделяют по форме не только для удаления плоских и вытянутых (игольчатых) зерен, но и для получения высокопрочных алмазных порошков, состоящих преимущественно из правильных, хорошо ограненных монокристаллов.

Алмазы АСМ (микропорошки) обладают нормальной абразивной способностью. Рекомендуются они для изготовления инструментов, паст и суспензий, применяемых при обработке твердых сплавов, закаленных сталей, стекла и других прочных материалов.

Алмазы АСН обладают повышенной абразивной способностью и рекомендуются для изготовления инструментов, паст и суспензий, применяемых при обработке природных и синтетических алмазов, корундов, специальной керамики и других сверхтвердых хрупких труднообрабатываемых материалов.

Синтетические алмазы типа баллас и карбонадо — поликристаллические вещества, полученные на основе порошков алмазов. Они используются преимущественно для изготовления резцов,

волок и других подобных инструментов. Однако после дробления и классификации они могут применяться и как абразивные порошки для изготовления абразивного инструмента.

Кубический нитрид бора

Кубический нитрид бора (КНБ) — кубическая модификация химического соединения бора и азота. Нитрид бора известен в виде белого порошка с гексагональной кристаллической решеткой, подобной графиту. Плотность гексагонального нитрида бора (2,2—2,25 г/см³) близка к плотности графита. Гексагональный нитрид бора такой же мягкий и скользкий, как графит, и его часто называют «белым графитом».

Углерод с тугоплавкими металлами образует соединения, называемые карбидами, которые обладают твердостью, как правило, в 5—10 раз большей твердости исходного металла. Соединения бора и азота с некоторыми металлами (бориды и нитриды) так же, как и карбиды, обладают высокой твердостью. Наличие общих свойств у графита и нитрида бора и особенно то, что оба вещества кристаллизуются в подобные друг другу гексагональные решетки с близкими параметрами, натолкнуло на мысль, что нитрид бора может существовать и в кубической модификации. Обработка гексагонального нитрида бора в специальной камере при таких же примерно значениях давления и температуры, как и при синтезе алмаза, подтвердила это предположение. Параметры решетки и минимальное межатомное расстояние кубического нитрида бора несколько больше, чем у алмазов, а именно: 3,615 Å (вместо 3,567 Å) и 1,56 Å (вместо 1,54 Å). Кроме того, решетка алмаза выполнена из атомов одного элемента (углерода), а кубического нитрида бора — из атомов двух элементов (бора и азота). При этом количество атомов бора и азота в решетке одинаково. Каждый атом бора соединен с четырьмя атомами азота, расположенными в пространстве по вершинам тетраэдра. Теоретическая плотность кубического нитрида бора (3,48 г/см³) меньше теоретической плотности алмаза (3,51 г/см³), что объясняется большим расстоянием между атомами.

При измерениях микротвердости кубического нитрида бора различные исследователи получают различные показатели. Это объясняется тем, что твердость измеряется на приборе Виккерса или ПМТ-3 при помощи алмазной пирамиды, твердость которой близка к твердости исследуемого материала. Наиболее вероятной микротвердостью кубического нитрида бора следует считать около 8000 кгс/мм². Несмотря на несколько меньшую твердость, кубический нитрид бора наряду с алмазом обладает уникальными абразивными свойствами и превосходит по износостойкости все известные абразивные материалы, применяемые в технике. Кубический нитрид бора выгодно отличается от алмаза высокой теплостойкостью. Он не теряет своих режущих свойств даже при температуре 1200° С. Масса кубического нитрида бора, так же как и алмаза, измеряется в каратах.

Таблица

Основные физико-механические свойства абразивных материалов

Свойства	Алмаз	Карбид бора	Карбид кремния	Электрокорунд	Кубический нитрид бора
Плотность в г/см³	3,48—3,56	2,48—2,52	3,12—3,20	3,93—4,01	3,44—3,49
Микротвердость в кгс/мм²	10 000	3700—4300	3000—3300	1800—2600	7500—8500
Модуль упругости в кгс/мм²	90 000	29 600	36 500	—	72 000
Предел прочности в кгс/мм²:					
на сжатие	200	180	150	76	50
на изгиб	21—49	21—28	5—15	8—9	—
Коэффициент теплопроводности при 0° С в кал/см·с	0,35	0,025	0,037	0,047	—
Удельная теплопроводность в кал/г·град	0,12	—	0,14	0,18	—
Коэффициент линейного расширения в 1/град·10^{-6}	0,9—1,45	4,5	6,5	7,5	—

В процессе изготовления кубического нитрида бора имеется возможность варьирования физико-механических и эксплуатационных свойств его в довольно широких пределах в зависимости от различных технологических факторов, таких как параметры синтеза (давление, температура, время выдержки), растворитель (катализатор) и добавки. Поэтому синтезируемый различными производителями кубический нитрид бора имеет существенные отличия и выпускается под различными торговыми марками. Так, Ленинградский абразивный завод «Ильич» выпускает эльбор, Опытный завод института сверхтвердых материалов — кубонит. В США фирма Дженерал-Электрик изготовляет материал под названием боразон.

Как указывалось выше, кубический нитрид бора обладает большей теплостойкостью, но несколько меньшей твердостью, чем алмаз. Кубический нитрид бора используется в основном для изготовления абразивного инструмента, применяемого при обработке деталей из черных металлов. Для обработки твердого сплава и неметаллических материалов кубический нитрид бора не используется, так как он имеет меньшую твердость, чем алмаз. В табл. 1 приводятся сводные данные об основных свойствах абразивных материалов.

Глава II. ПОРОШКИ

§ 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Из природных и искусственных абразивных материалов, включая алмазы и кубический нитрид бора, после дробления и классификации получают порошки различной зернистости. Порошки представляют собой совокупность зерен (частиц) абразивного материала различной величины и формы в виде кристаллов, осколков кристаллов и агрегатов (поликристаллов). Различают: более крупные порошки, получаемые рассевом на ситах — шлифзерно и шлифпорошки; мелкие порошки, которые получают методами гидроклассификации — микропорошки, тонкие микропорошки и субмикропорошки. Точное определение границы между обеими группами порошков невозможно, так как имеется зона перекрытия, в которой порошки могут быть получены как рассевом, так и гидроклассификацией.

Гидроклассификация осуществляется в специальных аппаратах и центрифугах путем последовательного выделения сначала более крупных, а затем все более и более мелких фракций с многократным контролем и доводкой порошков до требуемого состава. Этот процесс требует особой чистоты, высокой культуры производства и является весьма трудоемким и дорогим. Вот почему стоимость микропорошков всегда выше стоимости шлифзерна и шлифпорошков, полученных из одного и того же абразивного материала.

Получить абразивный порошок, состоящий из зерен одного размера, практически невозможно. Поэтому при производстве и контроле порошок подразделяют на фракции. Фракцией называется часть зерен данного порошка, размеры которых ограничены более узким интервалом, чем весь порошок. Метод определения размеров зерен зависит от способа получения порошка. Для порошков, получаемых ситовым методом, размер фракции определяется размером ячеек двух смежных сит, через одно из которых данная фракция проходит, а на другом задерживается. При таком измерении оба смежных сита выполняют роль предельного контрольного калибра: верхнее (с большим размером ячейки в свету) является как бы проходным калибром, а нижнее (с меньшим размером ячейки сита в свету) — непроходным калибром.

В Советском Союзе для просева алмазных порошков используются проволочные сита (ГОСТ 3584—73), размеры которых построены на основе ряда предпочтительных чисел (ГОСТ 8032—56), представляющего собой геометрическую прогрессию со знаменате-

лем $\sqrt[10]{10} \approx 1{,}259$. В некоторых странах используют систему обозначения размера ячеек сит, при которой их размер определяется числом меш, соответствующим количеству отверстий на 1 погонном дюйме. В этом случае линейный размер ячейки в свету зависит не только от количества ячеек, но также и от диаметра проволоки, из которой сито изготовлено. При обозначении размеров ячеек сита в мешах чем больше номер сита, тем меньше размер ячейки.

Микропорошки классифицируются не на ситах, а методом гидроклассификации. Размеры их зерен измеряются микроскопом; отсюда и происходит название — микропорошки.

Зерна порошков имеют неправильную форму, поэтому определить их размеры весьма трудно. До сих пор нет универсального, общепринятого метода измерений. В результате в стандартах различных стран всегда четко оговаривается методика определения размеров зерен микропорошков. В советских стандартах размер зерен микропорошков из обычных абразивных материалов опреде-

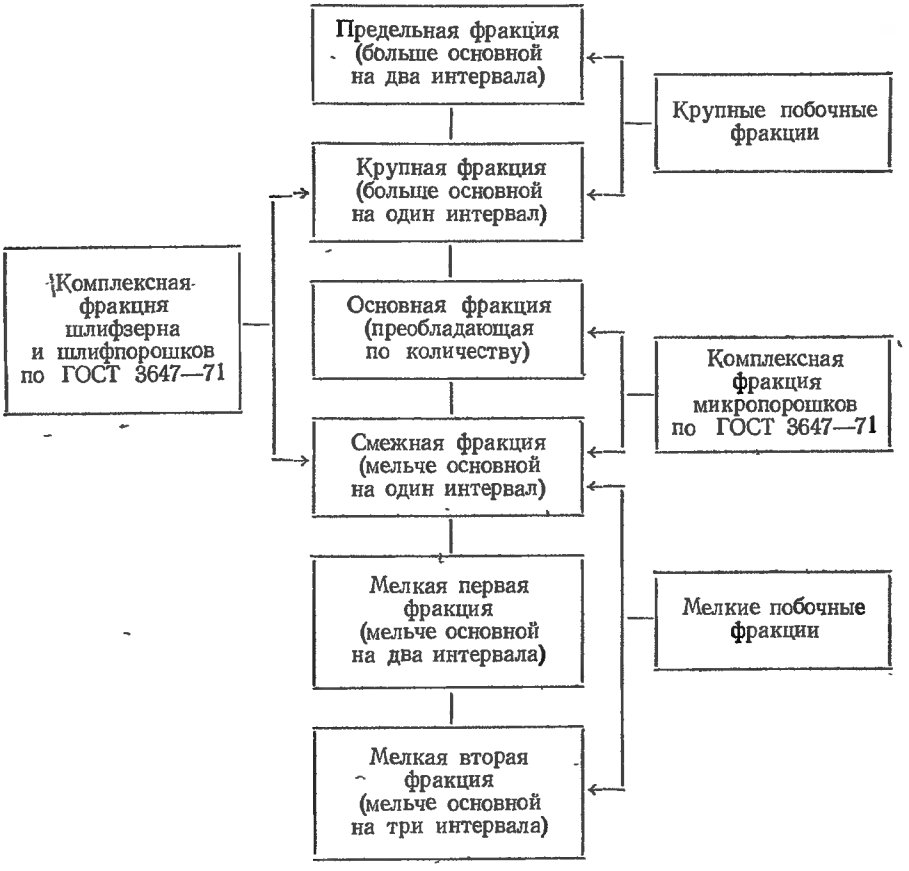


Рис. 6. Фракции абразивных порошков

ляется наибольшей шириной проекции зерна на предметном стекле микроскопа, а размер зерна алмазных микропорошков — полусуммой ширины и длины зерна.

Как уже отмечалось, изготовить порошок, состоящий из одинаковых зерен, невозможно. Поэтому он всегда состоит из нескольких фракций: основной и побочных. Основной фракцией называется совокупность зерен, преобладающая по количеству (массе) в порошке. Побочные фракции содержат зерна крупнее основной (крупная и предельная) и мельче основной (мелкая и смежная). Крупной называется фракция, зерна которой на один интервал больше основной, предельной — на два интервала. Смежной называется фракция, зерна которой мельче на один интервал, а мелкой — мельче на два и более интервала. В порошках абразивных материалов, исключая алмазы и кубический нитрид бора, выделяют также комплексную фракцию, состоящую из нескольких фракций, например, крупной, основной и смежной. Схема строения порошка с учетом указанных фракций показана на рис. 6. Зернистость порошка определяется и характеризуется размером зерен основной фракции.

Качество порошка зависит не только от процентного содержания зерен основной фракции, но и от содержания побочных. Зерна крупной фракции наносят более глубокие царапины по сравнению с зернами основной, что снижает качество обработки поверхности при использовании порошка. Повышенное содержание в порошке зерен мелкой фракции влечет за собой снижение производительности обработки. Поэтому имеется тенденция к ужесточению зернового состава порошков путем повышения содержания зерен основной фракции и уменьшения побочных.

В Советском Союзе на зерновой состав всех абразивных материалов, за исключением алмаза и кубического нитрида бора, распространяется требование ГОСТ 3647—71 «Материалы абразивные в зерне». К порошкам алмаза и кубического нитрида бора, стоимость которых во много раз выше по сравнению с обычными абразивными порошками, предъявляются более жесткие требования.

§ 2. АБРАЗИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В ЗЕРНЕ

Понятие абразивные материалы в зерне относится к порошкам из электрокорунда различных марок, зеленого и черного карбида кремния, карбида бора и других абразивных материалов, исключая алмазы и кубический нитрид бора.

Порошки из обычных абразивных материалов предназначаются для производства абразивных инструментов и для использования в свободном состоянии на шлифовально-полировальных операциях. Они имеют строго определенный зерновой состав, который характеризует величину и однородность размеров зерен в данном порошке. Помимо требований к зерновому составу, который регламентируется ГОСТ 3647—71, контролируются также некоторые другие, имеющие важное значение, показатели качества порошков: содержание магнитного материала, абразивная способность, прочность, форма

зерен и др. Вследствие этого в процессе производства порошков предусматриваются специальные контрольные операции и технологические приемы для удаления примесей, повышения однородности по форме и т. д.

Зерновой состав порошков

Порошки из обычных абразивных материалов в зависимости от способа их изготовления условно делятся на два класса. К первому относятся продукты классификации на ситах, ко второму — гидроклассификации. Внутри каждого класса предусмотрено деление на группы по технологическим (эксплуатационным) особенностям порошков, входящих в них. Продукты рассева делятся на две группы: шлифзерно и шлифпорошки, а продукты гидроклассификации — на микропорошки и тонкие микропорошки. Каждая группа, в свою очередь, делится на порошки различной зернистости, номер которых определяется в зависимости от крупности зерен основной фракции данного порошка:

Группа материала	Номер зернистости
Шлифзерно	200, 160, 125, 100, 80, 63, 50, 40, 32, 25, 20, 16
Шлифпорошки	12, 10, 8, 6, 5, 4, 3
Микропорошки	М63, М50, М40, М28, М20, М14
Тонкие микропорошки	М10, М7, М5

Для продуктов рассева предусмотрено изготовление порошков 19-ти номеров зернистости. Как видно из табл. 2, номер зернистости

Таблица 2

Размеры ячеек сит, на которых выделяется основная фракция шлифзерна и шлифпорошка

Номер зернистости	Размер ячеек в мкм		Номер зернистости	Размер ячеек в мкм		Номер зернистости	Размер ячеек в мкм	
	Верхнее сито	Нижнее сито		Верхнее сито	Нижнее сито		Верхнее сито	Нижнее сито
200	2500	2000	40	500	400	10	125	100
160	2000	1600	32	400	315	8	100	80
125	1600	1250	25	315	250	6	80	63
100	1250	1000	25	315	250	5	63	50
80	1000	800	20	250	200	4	50	40
63	800	630	16	200	160	3	40	—
50	630	500	12	160	125			

порошка соответствует размеру ячеек сита (в сотых долях миллиметра), на котором задерживается основная фракция порошка. Например, если основная фракция проходит сито с размером ячеек 2000 мкм и задерживается на смежном сите 1600 мкм, то такой порошок обозначается номером 160,

Продукты гидроклассификации делятся на 9 номеров зернистости:

Номер зернистости	М63	М50	М40	М28	М20	М14	М10	М7	М5
Размеры зерен основной фракции в мкм	63—50	50—40	40—28	28—20	20—14	14—10	10—7	7—5	5—3

В отличие от шлифпорошков и шлифзерна к номеру зернистости микропорошков добавляется буква М. Номер порошка соответствует наибольшему размеру (в мкм) зерен основной фракции. Например, микропорошок с размером основной фракции 14—10 мкм обозначается номером М14.

В соответствии с техническими требованиями, предусмотренными стандартом, абразивные порошки одной и той же зернистости могут выпускаться с различным содержанием основной фракции. В зависимости от содержания основной фракции в обозначение порошка после номера вводят одну из добавочных букв В, П, Н или Д, причем буква В характеризует порошок с наиболее высоким содержанием основной фракции, Д — с наименьшим. С учетом различного содержания основной фракции стандарт на абразивные материалы в зерне предусматривает выпуск 92-х порошков различной зернистости, содержание основной фракции в которых составляет 36—60%.

Кроме содержания основной фракции, в абразивных порошках строго регламентируется также количество побочных фракций. Для шлифпорошков предусмотрено определенное содержание предельной, крупной, комплексной и мелких (первой и второй) фракций (табл. 3). Например, в шлифопорошке 12-П содержание основной фракции, которая задерживается на сите с размером ячеек 125 мкм, должно

Таблица 3

Зерновой состав шлифпорошков с содержанием основной фракции не менее 55%

Номер зернистости	Размер ячеек сит в мкм, на которых выделяется фракция						
	крупная		основная		комплексная		мелкая
	Проходит	Задерживается	Проходит	Задерживается	Проходит	Задерживается	Проходит
12П	200	160	160	125	200	160, 125 и 100	80
10П	160	125	125	100	160	125, 100 и 80	63
8П	125	100	100	80	125	100, 80 и 63	50
6П	100	80	80	63	100	80, 63 и 50	40
5П	80	63	63	50	80	63, 50 и 40	—
4П	63	50	50	40	63	50 и 40	—

Примечания:
1. Содержание основной фракции не менее 55% всей массы порошка, комплексной — не менее 90%, крупной — не более 15%, мелкой — не более 3%.
2. К комплексной фракции порошка 4П относятся также зерна размером 40—28 мкм.
3. Мелкая фракция порошка 5П состоит из зерен, размер которых меньше 28 мкм, порошка 4П — меньше 20 мкм.

быть по массе не менее 55%. Предельная фракция, задерживающаяся на сите 200 мкм, в этом порошке не допускается, а крупной, остающейся в сите 160 мкм, должно быть не более 15%. Комплексная фракция порошка 12-П включает в себя крупную, основную и смежную фракцию, которая выделяется на сите 100 мкм. В совокупности все эти фракции, образующие комплексную, должны составлять от общей массы порошка не менее 90%. Количество мелких фракций (первой, остающейся на сите 80 мкм, и второй, проходящей через это сито) должно быть не более 10%, причем вторая фракция должна составлять не более 3%.

Аналогично и в микропорошках предусматривается определенное содержание основной и побочных фракций. В качестве примера рассмотрим требования к зерновому составу микропорошка М20-В (табл. 4). По ГОСТу количество основной фракции (размер частиц

Таблица 4

Зерновой состав микропорошков и тонких микропорошков с содержанием фракции не менее 60—55%

Номер зернистости	Фракция									
	предельная		предельная плюс крупная		основная		комплексиая		мелкая	
	Размер зерен в мкм	Содержание в порошке в % от массы	Размер зерен в мкм	Содержание в порошке в % от массы	Размер зерен в мкм	Содержание в порошке в % от массы	Размер зерен в мкм	Содержание в порошке в % от массы	Размер зерен в мкм	Содержание в порошке в % от массы
М63-В	100—80	0,5	100—63	12	63—50	60	63—40	85	<40	3
М50-В	80—63		80—50		50—40		50—28		<28	
М40-В	63—50		63—40		40—28		40—20		<20	
М28-В	50—40		50—28		28—20		28—14		<14	
М20-В	40—28		40—20	15	20—14		20—10	80	<10	5
М14-В	28—20		28—14		14—10		14—7		<7	
М10-В	20—14		20—10	20	10—7	55	10—5	75	<5	
М7-В	14—10		14—7		7—5		7—3		<3	
М5-В	10—7		10—5		5—3		5—3	80	—	—

20—14 мкм) должно быть по массе не менее 60%. Количество побочных фракций распределяется следующим образом: предельной (40—28 мкм) — не более 0,5%; крупной совместно с предельной (40—20 мкм) — не более 15%; комплексной [основной вместе со смежной (20—10 мкм)] — не менее 80%, мелкой (мельче 10 мкм) — не более 5%. В ГОСТ 3647—71 приведены нормы зернового состава для всех номеров зернистости и даны методики определения зернового состава шлифзерна, шлифпорошков и микропорошков.

Для изготовления специального прецизионного инструмента ОСТ 2 МТ 71-2—71 предусматривает ужесточенные нормы зернового со-

става порошков электрокорунда и карбида кремния. Для зернистостей № 25—№ 3 установлено повышенное содержание основной фракции. ОСТ 2 МТ 71-1—71 установил дополнительно нормы зернового состава для трех номеров зернистости микропорошков: М1, М2 и М3. Эти особо тонкие микропорошки предназначены для использования в свободном виде на шлифовально-полировальных операциях.

Форма зерен абразивных порошков определяется их размерами, углами при вершине и радиусами закруглений режущих кромок. Она зависит от физико-механических свойств самого абразивного материала, а также от условий его дробления (измельчения) и классификации. О форме зерна можно судить на основании просмотра под микроскопом и зарисовки увеличенных контуров зерен с помощью специальных приборов, например, на часовом проекторе ЧП-2.

Размеры зерен определяются их длиной l, высотой h и шириной b ($l > b > h$). По форме зерна можно подразделить на изометричные (округлые), промежуточные, пластинчатые и игольчатые (мечевидные). Изометричные зерна отличаются наибольшей прочностью и предпочтительны для изготовления шлифовальных кругов, работающих со съемом больших припусков. Пластинчатые и игольчатые зерна имеют меньшую прочность и являются дефектными.

Углы при вершинах абразивных зерен находятся в пределах 40—145° С. При этом количество зерен с острыми углами составляет примерно 25—30%, а с углами более 90° — примерно 75—70%. По форме абразивные зерна очень разнообразны. Углы и радиусы зерен в процессе работы изменяются вследствие износа, выкрашивания и правки. Радиус закруглений граней абразивных зерен шлифзерна и шлифпорошков составляет 4—200 мкм, микропорошков — 0,08—5 мкм. Чем меньше радиус закругления зерен, тем более высокий класс шероховатости обработанной поверхности. Радиус закругления зерен зависит от материала абразивного порошка, например, радиус закругления зерен электрокорунда примерно в 3 раза больше, чем у зерен из зеленого карбида кремния.

Зерна абразивных материалов характеризуются также состоянием поверхности (гладкая, шероховатая) и кромок (острые, закругленные, прямолинейные, зазубренные и т. п.). Зерна-сростки, агрегатные и неплотные по структуре выдерживают меньшие силы резания и быстрее разрушаются.

Технология изготовления шлифзерна, шлифпорошков и микропорошков

Технология изготовления порошков из обычных абразивных материалов, таких как электрокорунд, карбид кремния и другие, включает следующие основные операции: дробление, измельчение, обогащение, сгущение, сушку, магнитную сепарацию, классификацию по номерам зернистости, а также контроль их качества. Различные

абразивные материалы подвергаются всем операциям обработки или части их. Соответствующее оборудование связано между собой транспортирующими устройствами, что обеспечивает возможность непрерывного процесса изготовления порошков. Шлифзерно и шлифпорошки классифицируются на специальных грохотах (ситах), микропорошки — в основном, методом гидравлической классификации: в восходящем потоке, путем осаждения в жидкости под действием силы тяжести (седиментация) или методом центрифугирования.

Процессы дробления, измельчения, обогащения и классификации абразивных материалов на шлифзерно, шлифпорошки и микропорошки различных зернистостей на каждом абразивном заводе имеют свои специфические особенности, которые зависят от типов применяемого оборудования, наличия примесей в исходном сырье, от количества выпускаемых зернистостей и других факторов. Однако принципиальных отличий в технологии производства порошков на различных абразивных заводах нет.

В качестве примера ниже приводится краткое описание технологического процесса производства шлифзерна, шлифпорошков и микропорошков нормального электрокорунда на Запорожском абразивном комбинате.

Дробление. Исходные куски нормального электрокорунда, прошедшие приемку ОТК, при помощи пластинчатого питателя поступают в щековые дробилки, в которых размельчаются до размеров 120—0 мм, а затем 50—0 мм; электрокорунд подается элеватором в бункер, расположенный над конусной дробилкой. Конусная дробилка работает в замкнутом цикле с виброгрохотом сухого рассева. Частицы размером более 20 мм возвращают на дополнительное дробление в конусную дробилку, а размером менее 20 мм, пройдя для удаления продуктов, содержащих железо, магнитную сепарацию, поступают в бункеры, расположенные над стержневыми мельницами. Магнитный продукт сепарации транспортируется для повторного магнитного обогащения на барабанный сепаратор с целью разделения его на отвальный ферросплав и сростки. Слабомагнитные продукты после первой и второй стадий обогащения в барабанных магнитных сепараторах с содержанием магнитной фракции не более 10—12% направляются снова в мельницу для дробления.

Измельчение производят с целью доведения исходного дробленого электрокорунда размером 20 мм до размера, обеспечивающего получение шлифзерна и шлифпорошков в заданном ассортименте. Измельчение осуществляется в стержневых мельницах типа 4-СМ2 размером $D \times l = 1200 \times 2400$ мм, работающих в замкнутом цикле с грохотом мокрого рассева. Грохот снабжен щелевидной или плетеной сеткой с квадратными ячейками. Электрокорунд подают в мельницы вибропитателями, а измельченный продукт на грохот — элеватором. Измельчение производится стержнями из стали ШХ15; масса загружаемых стержней около 4 т. Электрокорунд размером 2 или 1,6 мм направляют на дополнительное дробление в мельницу, а пульпу при помощи насосов транспортируют на обезвоживающие классификаторы.

Обезвоживание и сушка. Обезвоживание с получением влажности электрокорунда не менее 15% осуществляется в реечном классификаторе при стоке воды и шламов, а также при фильтрации через керамические фильтровальные элементы с помощью вакуум-насоса. Затем электрокорунд сушат при температуре 400—550° С во вращающихся прокалочных печах барабанного типа. Движение электрокорунда и газов осуществляется по принципу противотока. Топливом для печей является природный газ. После сушки материал охлаждают в холодильном барабане, который омывается снаружи проточной водой.

Сухая электромагнитная сепарация применяется для удаления частиц ферросплава, а также сростков корунда с ферросплавом, сростков шлака с ферросплавом и частиц стали, попадающих в измельченный продукт вследствие износа футеровки дробильной аппаратуры и стержней. Шлифзерно и шлифпорошки, отвечающие техническим требованиям, получают за три стадии магнитной сепарации. Две стадии осуществляются на барабанных магнитных сепараторах типа БССА диаметром 350 мм, а третья стадия — на индукционно-роликовых магнитных сепараторах. Содержание магнитной фракции до сепарации составляет 0,8—1,2%, после сепарации второй стадии 0,1—0,5%, а в продукте индукционно-роликовых сепараторов 0,10—0,3%.

Рассев шлифзерна и шлифпорошков по номерам зернистости в соответствии с требованиями ГОСТ 3647—71 производится на шестидечных (с шестью параллельно работающими ситами) плоскокачающихся грохотах. Рассев осуществляется от крупного к мелкому, отдельно шлифзерна и шлифпорошков. Вначале производят предварительный рассев на классы. Размер класса определяется размером ячеек сит, на которых производился рассев. Порошок, задерживающийся на сите с размером ячеек 2000 мкм, образует класс +2000 мкм. Порошок, все частицы которого проходят через сито с размером ячеек 2000 мкм и задерживаются на сите с размером ячеек 630 мкм, образует класс +2000 — 630 мкм (плюс 2000 минус 630 мкм). При рассеве электрокорунда, например, образуются классы: +2000 мкм, —2000 + 630 мкм, —630 + 315 мкм, —315 мкм.

После контрольной магнитной сепарации на соответствующем индукционно-роликовом магнитном сепараторе каждый класс самотеком направляется на окончательную классификацию для получения шлифзерна зернистости 160, 125, 100, 80, 63, 50, 40, 32, 25, 20, 16.

При классификации шлифзерна получаются порошки классов — 160 + 63 мкм и —63 мкм. Прошедший электромагнитное обогащение порошок класса —160 + 63 мкм является исходным материалом для получения шлифпорошков зернистостью 12—6, которые классифицируют на грохоте с механической очисткой сеток. Класс —63 мкм является исходным для получения шлифпорошков зернистостью 6—4, рассев которых осуществляется на грохоте производительностью 100—150 кг/ч. После контроля ОТК соответствия порошка нормам зернового состава определяют химический и мине-

ралогический состав электрокорунда. При положительных результатах анализа порошок упаковывают и маркируют.

Технологическая схема изготовления микропорошков из нормального электрокорунда приведена ниже. Исходное сырье, предназначенное для изготовления микропорошков, измельчают в шаровой мельнице СМ-601 (D = 1,5 м; L = 3 м) непрерывного действия, работающей в замкнутом цикле с реечным классификатором. Мельница футерована плитами из марганцовистой стали. Измельчение производится в воде с соотношением твердого материала и жидкости Т : Ж = 2 : 1 (3 : 1). Слив (суспензия) реечного классификатора с крупностью зерен —63 мкм поступает в сгущающий конус диаметром 4 м. Через транспортирующие пневмобачки чистая вода из сгущающего конуса сливается, а сгущенный материал с содержанием твердого вещества 50—55% через пневмобачки поступает на химическое обогащение для удаления примесей.

Химическое обогащение производится с использованием серной кислоты в аппаратах непрерывного действия (в чанах). Отмывка после химического обогащения производится на вакуум-фильтрах непрерывного действия. Отмытый продукт поступает в чаны КЧ-2 пульпоприготовления объемом 5,7 м³. Внутри каждого чана установлена мешалка. Для приготовления пульпы добавляют воду с таким расчетом, чтобы концентрация продукта была 12—14%, а также стабилизатор — жидкое стекло из расчета 0,5% массы твердого продукта.

Крупнозернистые микропорошки до М14 включительно и шлифпорошки № 4 и 5 классифицируют в восходящем потоке жидкости в конусах, расположенных в три линии. Каждый конус питается через трехпозиционный питатель. В то время как одну линию загружают, две остальные промывают. Для микропорошков время загрузки 3 ч, время промывки 6 ч; для шлифпорошков время загрузки 1,5 ч, время промывки 3 ч. Порошки, доведенные до кондиции по зерновому составу, а также порошки класса —10 мкм обезвоживают на роторных центрифугах непрерывного действия, сушат и подвергают контрольному рассеву на грохотах (сетка 37—40 мкм) для извлечения посторонних включений. Порошки класса +63 мкм дополнительно дробят в шаровой мельнице, а класса —10 мкм являются исходными для изготовления путем седиментации микропорошков зернистостью М10—М5. После классификации готовые микропорошки осаждают на центрифугах, сушат и подвергают контрольному рассеву на протирочных ситах. Порошки класса +10 мкм поступают в чаны-сборники для класса —40 мкм, а порошки класса —3 мкм после осаждения на центрифугах и сушки складируются.

Классификация микропорошков при размерах частиц менее 14 мкм методом седиментации является непроизводительным процессом, так как с уменьшением крупности сливаемых частиц резко возрастает время их осаждения. Частицы крупностью 5, 1 и 0,5 мкм осаждаются за сутки соответственно на глубину 300, 12 и 3 см. Вследствие конвекционных токов в суспензии и броуновского движения точно классифицировать микропорошки при размерах частиц менее

1 мкм осаждением под действием силы тяжести практически невозможно. Более производительна и эффективна классификация мелкозернистых микропорошков в гидроциклонах и непрерывнодействующих центрифугах.

Контроль качества порошков

Для каждого абразивного материала установлены обязательные показатели качества, по которым контролируют готовую продукцию: зерновой и химический составы порошков, содержание магнитного материала, насыпная масса (масса единицы объема свободно насыпанного порошка), абразивная способность, механическая прочность, наличие железистых включений и др. Эти показатели определяются по единым методикам, предусматривающим определенную последовательность операций контроля, а также применяемые при этом приборы, приспособления и материалы.

При контроле зернового состава абразивных материалов из каждой партии отбирают пробу для каждого номера зернистости в количестве не менее 5% всей массы (или не менее 5% предъявляемых к приемке упаковочных мест). Пробу отбирают пробоотборником (щупом), который вводят в материал под углом. При этом суммарная масса пробы должна быть: 800 г для шлифзерна, 500 г для шлифпорошков, 100 г для микропорошков. Одну часть пробы направляют в лабораторию для испытания, другую — в отдел технического контроля для хранения в течение трех месяцев на случай арбитражного анализа.

При анализе зернового состава шлифзерна и шлифпорошков с помощью сит предусматривается определение остатков фракций на ситах в процентах от общей массы просеянного материала. Отобранную пробу предварительно сушат при 110 ± 5° С в течение 30 мин и охлаждают до температуры окружающей среды. Затем пробу сокращают при помощи струйчатого делителя или методом квадратования и взвешивают 100 г. Анализ производят на наборе сит с контрольными сетками (ГОСТ 3584—73) механическим рассевом навески средней пробы на специальной установке, встряхивающей сита 140—150 раз в минуту.

Из комплекта контрольных сит выбирают сита, необходимые для анализа порошка соответствующего номера зернистости, собирают их в стопку по убывающему номеру сеток и вставляют нижнее сито в поддон. На верхнее сито помещают навеску для анализа, закрывают сито крышкой и устанавливают набор сит на сотрясательную машину. В зависимости от контролируемого номера зернистости устанавливают следующую продолжительность встряхивания: 5 мин при зернистости 200—10 и 10 мин при зернистости 8 и мельче.

Остатки, полученные на каждом сите (начиная с верхнего сита), ссыпают и взвешивают с точностью до 0,1 г. Так как навеска испытуемого порошка составляет 100 г, то масса остатков на ситах в граммах соответствует процентному содержанию ее в порошке.

При микроскопическом анализе определяют размеры и подсчитывают количество просмотренных зерен отдельных фракций порошков. Зерновой состав микропорошков анализируют при помощи поляризационного или биологического микроскопа, снабженного окулярным микрометром с увеличением 200—280 для микропорошков зернистостью М40; М28; с увеличением 300—420 для порошков зернистостью М20, М14 и с увеличением 420—900 для порошков зернистостью М10 — М5. Для анализа от пробы методом квадратования отбирают две навески по 5—7 г, в одной из которых проверяют наличие зерен, размер которых больше предельного. Если такие зерна отсутствуют, вторую навеску тщательно перемешивают на стекле и распределяют в виде полоски длиной 7—8 см и шириной 1 см. Полоску в поперечном направлении делят на семь-восемь частей, каждую четную часть удаляют, а оставшиеся нечетные части перемешивают и снова сокращают тем же способом до 0,5—1 г.

Линейный размер зерна определяют при помощи окулярного микрометра путем отсчета по его шкале числа делений, перекрываемых наибольшей шириной зерна. При анализе определяют размер зерен всех фракций. Зерен комплексной фракции должно быть замерено для микропорошков: с индексом В — не менее 1500, с индексом П, Н и Д — не менее 500. Зерна размером менее 0,5 деления шкалы не учитываются. Результаты микроскопического анализа выражают после пересчета в процентах по массе. При пересчете принимают, что масса зерна прямо пропорциональна кубу линейного размера. Массу зерен предельной и крупной фракций подсчитывают из фактически измеренной ширины зерна, а для остальных для среднего размера фракции.

Химический состав, содержание магнитного материала, насыпная масса и наличие железистых включений регламентируются соответствующими техническими условиями. Величина насыпной массы является технологической характеристикой порошка, зависит от материала и зернового состава его и составляет 1,5—1,9 г/см^3 для порошков из электрокорунда; 1,7—2 г/см^3 для монокорунда и 1,4—1,6 г/см^3 для зеленого карбида кремния.

Абразивная способность порошков характеризуется количеством снятого материала при заданных условиях шлифования и зависит от физических свойств абразивного материала и состояния поверхности зерен.

Абразивная способность порошка определяется отношением количества сошлифованного определенной навеской порошка материала, например стекла, к количеству материала, сошлифованного в тех же условиях такой же навеской эталонного порошка. В качестве эталонного порошка, как правило, используют алмазный порошок. Абразивная способность порошка зависит от многих одновременно действующих факторов (твердости зерна, твердости обрабатываемого материала, зернового состава порошка и его прочности, наличия примесей, условий шлифования) и может изменяться в широких пределах. Например, при шлифовании стекла абразивная способность порошка зеленого карбида кремния в 2—3 раза меньше,

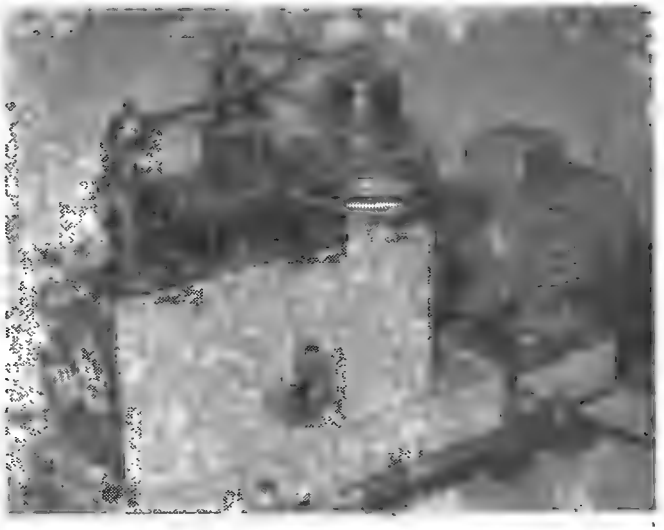


Рис. 7. Установка АСЗ-4

чем у карбида бора. В некоторых случаях, например, для сравнения абразивной способности электрокорундов различных марок, в качестве обрабатываемого материала используют инструментальную сталь, а эталоном служит порошок монокорунда.

Абразивная способность порошков определяется методом Миндта на установке АСЗ-4 (рис. 7), представляющей собой настольный шлифовальный станок с горизонтальной планшайбой. На этой установке производится шлифование образца навеской испытываемого порошка. Режим работы установки: частота вращения планшайбы 57 об/мин; число двойных ходов образца по планшайбе в минуту 62; давление образца на планшайбу 0,23 г/мм². Продолжительность испытания соответствует 3200 оборотам планшайбы для карбида бора и 1600 оборотам для карбида кремния и других абразивов меньшей твердости. Планшайба диаметром 110 мм, на которую наносится испытуемый порошок, изготовляется из стали 45, закаленной до твердости *HRC* 56—60. Шлифуемый образец представляет собой диск из стекла К-8 диаметром 50 мм. Навеска абразивного порошка берется равной 50 мг. Смачивающая жидкость — вода. Масса стеклянного диска проверяется до и после испытаний. По разнице измерений судят об абразивной способности порошка. Относительная абразивная способность

$$A = \frac{B_1 - B_2}{B_{1A} - B_{2A}},$$

где B_1 и B_2 — масса стеклянного диска до и после шлифования испытываемым порошком;

B_{1A} и B_{2A} — масса стеклянного диска до и после шлифования алмазным порошком.

Если принять абразивную способность алмаза за единицу, то абразивная способность других абразивных материалов зернистости 10—12 (160—100 мкм) при шлифовании стекла выражается величинами, приведенными в табл. 5 (по данным ВНИИАШа).

Таблица 5

Соотношение величин абразивной способности алмаза и других абразивных материалов

Абразивные материалы	Абразивная способность	Абразивные материалы	Абразивная способность
Алмаз	1,00	Монокорунд	0,15—0,25
Кубический нитрид бора	0,58—0,60	Электрокорунд	0,14—0,16
Карбид бора	0,50—0,60	Наждак	0,03—0,08
Карбид кремния . . .	0,25—0,45	Кварц	0,02—0,03

Однако при шлифовании твердых сплавов в реальных условиях алмаз имеет абразивную способность во много раз выше, чем карбид кремния и электрокорунд, а не в 3—7 раз, как это вытекает из приведенных в табл. 5 величин. Абразивная способность зависит от размеров, формы зерен и их строения. Наличие дефектных зерен снижает абразивную способность; особенно это относится к пластинчатым зернам.

Прочность порошков из абразивных материалов определяется по отношению количества зерен порошка, не изменивших свои размеры под воздействием стандартной нагрузки при сжатии с определенным удельным давлением в замкнутом объеме, к общему количеству зерен.

Механическая прочность зерен абразивных порошков определяется по стандартной методике путем сжатия в цилиндрической пресс-форме диаметром 2 см при давлении 250 кгс/см² навески исследуемого порошка в 5 г и последующего выделения путем рассева зерен исходной фракции порошка, оставшихся неразрушенными. Прочность порошка определяется условно в процентах по массе зерен, сохранивших свой первоначальный размер:

$$H = \frac{P_{кон}}{P_{исх}} \cdot 100\%,$$

где $P_{исх}$ — масса пробы порошка, подвергающегося испытанию, в г;
$P_{кои}$ — масса зерен, оставшихся неразрушенными после приложения нагрузки, в г.

Прочность зерен зависит как от химического состава, так и от их величины. Чем меньше зерна, тем больше удельная прочность при сжатии. Например, зерна карбида бора размером 42—50 мкм в несколько раз прочнее, чем зерна размером 250—420 мкм. Зерна монокорунда зернистостью 40—16, как правило, имеют более высокую (на 20—25%) прочность, чем зерна электрокорунда. Зерна монокорунда, представляющие агрегаты и сростки крупнее 500 мкм, имеют значительно меньшую механическую прочность, чем монолитные зерна. Механическая прочность зерен, определяемая путем

их раздавливания в замкнутом объеме, является характеристикой технологических свойств порошков.

Одним из основных свойств абразивных материалов является их высокая твердость. Под твердостью понимают степень сопротивления минерала какому-либо внешнему механическому воздействию. Наиболее простым и распространенным методом определения относительной твердости является метод царапания. На его основе была разработана шкала твердости, предложенная немецким минералогом Моосом с десятью эталонами, по которой тальк занимает первое место, корунд девятое и алмаз десятое место. В шкале Мооса каждый последующий минерал царапает предыдущий. Для практических целей шкала Мооса очень удобна, но более точные исследования показали, что ступени ее крайне неравномерны.

В настоящее время широко распространен, предложенный М. М. Хрущовым и Е. С. Берковичем, метод измерения твердости минералов при помощи твердомера ПМТ-3. Этот метод позволяет определять твердость различных минералов — от самых мягких (талька) до самых твердых (алмаза), причем в микроскопических зернах. Исследования показывают, что между номерами эталонов шкалы Мооса и твердостью при их испытании вдавливанием имеется только качественная зависимость. Эта зависимость состит в том, что большему номеру соответствует более высокая твердость (табл. 6).

Таблица 6

Результаты испытаний твердости эталонных минералов

Минерал	Твердость		Минерал	Твердость	
	по Моосу	по М. М. Хрущову в кгс/мм²		по Моосу	по М. М. Хрущову в кгс/мм²
Тальк	1	2,4	Ортоклаз	6	795
Гипс	2	36	Кварц	7	1 120
Кальцит	3	109	Топаз	8	1 427
Флюорит	4	189	Корунд	9	2 060
Апатит	5	536	Алмаз	10	10 060

§ 3. ПОРОШКИ ИЗ АЛМАЗОВ

Зерновой состав порошков

В отличие от порошков из обычных абразивных материалов алмазные порошки обладают значительно большей абразивной способностью и твердостью.

К ним предъявляются более жесткие требования по зерновому составу, прочности, абразивной способности, содержанию примесей и по ряду других показателей. Зерна алмазных порошков выгодно отличаются своей геометрией. Углы и радиусы заострения режущих кромок у них значительно меньше, чем, например, у электрокорунда

и карбида кремния. Они длительное время сохраняют режущую способность и форму, обеспечивая высокую производительность.

В зависимости от размера зерен и способа их классификации алмазные порошки делятся на три группы:

1) шлифпорошки, получаемые путем рассева на ситах с контролем зернового состава ситовым методом; изготовляются они обычно размером более 60 мкм;

2) микропорошки размером 60 мкм и менее, получаемые путем классификации с использованием жидкости, методом седиментации и центрифугирования с последующим контролем зернового состава микроскопическим методом;

3) субмикропорошки с размеров зерен менее 1 мкм, получаемые при помощи высокооборотных центрифуг и суперцентрифуг; их зерновой состав контролируют с помощью электронного микроскопа.

Алмазный порошок состоит из трех фракций — основной, крупной и мелкой. Основной фракцией называется совокупность зерен определенного размера, преобладающих в составе данного порошка по массе (в шлифпорошках) или по количеству зерен (в микропорошках). Алмазные шлифпорошки выпускаются с узким и широким диапазоном зернистости. Из последних изготовляют инструмент, используемый на менее ответственных операциях, когда к обрабатываемым деталям не предъявляются повышенные требования по точности и шероховатости поверхности. Крупность основной фракции порошка узкого диапазона зернистости определяется размерами ячеек двух смежных контрольных сит из ряда по ГОСТ 3584—73, из которых через одно сито зерна порошка должны проходить, а на другом — задерживаться.

Крупность основной фракции порошка широкого диапазона зернистости определяется размерами ячеек сит по ГОСТ 3584—73, разделенных в ряду двумя интервалами.

Зернистость шлифпорошков обозначают дробью, в которой числитель соответствует размеру ячеек верхнего, а знаменатель — размеру ячеек нижнего сита в микрометрах, на которых выделяются зерна основной фракции данного порошка. Например, у алмазного порошка АСВ 125/100 зерна основной фракции проходят через сито с размером ячеек в свету 125 мкм и задерживаются на сите с размером ячеек 100 мкм. Если просмотреть этот порошок под микроскопом и определить линейный размер зерен основной фракции, то он будет примерно равен 160—200 мкм. Увеличение линейного размера по сравнению с размером ячеек объясняется тем, что некоторые из зерен проходят через ячейку по диагонали.

Зернистость и нормы зернового состава шлифпорошков из природных и синтетических алмазов разных марок по ГОСТ 9206—70 приведены в табл. 7. Размеры и содержание в процентах по массе основной и побочных фракций оговариваются стандартом для узкого и широкого диапазона классификации. Содержание предельной фракции не допускается. Зерна крупной фракции могут задерживаться на сите в количестве не более 15%, основной фракции — не менее 70%, а мелкой могут проходить через сито не более 3% по массе.

Таблица 7

Зерновой состав алмазных шлифпорошков

Диапазон зернистости	Зернистость	Фракция			
		крупная		основная — должно задерживаться на сите не менее 70%	мелкая — может проходить через сито не более 3%
		Должно проходить через сито 100%	Может задерживаться на сите не более 15%		
Широкий	400/250	500	400	250	200
	250/160	315	250	160	125
	160/100	200	160	100	80
	100/63	125	100	63	50
	63/40	80	63	40	—
Узкий	630/500	800	630	500	400
	500/400	630	500	400	315
	400/315	500	400	315	250
	315/250	400	315	250	200
	250/200	315	250	200	160
	200/160	250	200	160	125
	160/125	200	160	125	100
	125/100	160	125	100	80
	100/80	125	100	80	63
	80/63	100	80	63	50
	63/50	80	63	50	40
	50/40	63	50	40	—

Примечания:
1. В таблице приводятся размеры ячеек сит в мкм.
2. Содержание фракций указано в % по массе.

Примеры условного обозначения шлифпорошков зернистостью 100/63: марки А из природных алмазов — шлифпорошок А 100/63 ГОСТ 9206—70; марки АСО из синтетических алмазов — шлифпорошок АСО 100/63 ГОСТ 9206—70.

Зернистость микропорошков, как и шлифпорошков, обозначается дробью, у которой числитель соответствует наибольшему, а знаменатель — наименьшему размеру зерен в микрометрах основной фракции. Обозначения зернистости микропорошков и субмикропорошков приведены в табл. 8 и 9. В Советском Союзе выпускаются микропорошки одиннадцати зернистостей размером зерен 60—1 мкм и субмикропорошки четырех зернистостей с размером зерен 0,7—0,1 мкм. Микропорошки марок АСМ и АМ зернистостью 60/40—1/0 и марок АСН и АН зернистостью 60/40—5/3 выпускают по ГОСТ 9206—70. Субмикропорошки изготовляют по специальным техническим условиям. Примеры условного обозначения микропорошка зернистостью 40/28: марки АМ из природных алмазов — микропорошок АМ 40/28 ГОСТ 9206—70; марки АСН из синтетических алмазов — микропорошок АСН 40/28 ГОСТ 9206—70. Все зерна основной фракции данного порошка имеют размеры 40—28 мкм. Зерновой состав

Таблица 8

Зерновой состав алмазных микропорошков АСМ, АСН, АМ и АН

Зернистость	Фракция (мкм)			Зернистость	Фракция (мкм)		
	крупная, не более 5%	основная, не менее 65%	мелкая, не более 30%		крупная, не более 5%	основная, не менее 65%	мелкая, не более 30%
60/40	80—60	60—40	40—20	5/3	7—5	5—3	3—1
40/28	60—40	40—28	28—14	3/2	5—3	3—2	до 2
28/20	40—28	28—20	20—10	2/1	3—2	2—1	до 1
20/14	28—20	20—14	14—7	1/0	2—1	до 1 (не менее 95%)	—
14/10	20—14	14—10	10—5				
10/7	14—10	10—7	7—3				
7/5	10—7	7—5	5—2				

Примечания:
1. Зерна, размеры которых совпадают с верхним или нижним пределами, указанными в основной фракции, следует относить к этой же фракции.
2. Содержание фракций указано в % по количеству зерен.

Таблица 9

Зерновой состав (в мкм) субмикропорошков из синтетических алмазов по ТУ 88 УССР ИСМ 376—73

Зернистость	Фракция					
	крупная		основная		мелкая	
	Размер зерен в мкм	Число зерен в % (не более)	Размер зерен в мкм	Число зерен в % (не менее)	Размер зерен в мкм	Число зерен в % (не более)
0,7/0	1—0,7	1	0,7—0,3	50	До 0,3	49
0,5/0	0,7—0,5		0,5—0,1	60	До 0,1	39
0,3/0	0,5—0,3		До 0,3	99	—	—

микропорошков марок АСМ и АСН характеризуется количеством зерен в отдельных фракциях по счету в процентах и должен соответствовать указанному в табл. 8. В микропорошках и субмикропорошках допускается не более 2% удлиненных зерен с отношением длины к ширине более трех.

Для контроля порошков из синтетических алмазов от каждой предъявляемой к приемке партии производится отбор пробы следующим образом. Порошок после тщательного перемешивания высыпают на гладкую бумагу, разравнивают тонким слоем в квадрат со стороной 30—50 см. Затем этот квадрат делят на малые квадраты со стороной около 5 см. Из середины малых квадратов шпателем отбирают порошок так, чтобы в сумме получилось: не менее 40 г для шлифпорошков и не менее 2 г для микропорошков. Полученные пробы делят на две равные части. Одна часть идет на испытания, а вторая после приемки порошка запечатывается в флакон и хранится в течение одного года на случай арбитражной проверки.

Порошки всех зернистостей расфасовывают в пластмассовые или стеклянные флаконы по 10, 25, 50, 100, 250, 500, 1000, 2500 и 5000 ка-

ратов по желанию заказчика. Точность взвешивания при расфасовке: ±0,05 карата для массы 10—50 каратов; ±0,1 карата для массы 100—1000 каратов; ±0,2 карата для массы 2500—5000 каратов.

Для эффективного использования порошков из алмазов и инструмента из них крайне важно правильно выбрать оптимальные для заданных условий обработки марку и зернистость алмазного порошка.

Технология изготовления шлифпорошков

Исходным сырьем для изготовления шлифпорошков служат синтетические алмазы с крупностью сростков до 3 мм, прошедшие обогащение (удаление графита и катализаторов из продукта синтеза алмазов).

В связи с тем, что физико-механические свойства синтетических алмазов АСО, АСР, АСВ, АСК и АСС существенно отличаются, технологические процессы изготовления шлифпорошков каждой марки имеют свои специфические особенности. Изготовление шлифпорошков отличается значительной сложностью, трудоемкостью и требует высокой квалификации труда. Технологическая схема изготовления шлифпорошков АСО приведена на рис. 8. В соответствии с приведенной схемой исходные сростки синтетических алмазов АСО дробят в шаровой мельнице ($D \times L = 200 \times 250$ мм) при режимах работы, обеспечивающих наибольший выход крупных фракций. Единовременная загрузка алмаза в барабан мельницы составляет 10 000 каратов, время измельчения 10—20 мин (в зависимости от крупности исходного сырья). Выход порошка класса —40 мкм составляет не более 20—25% (все зерна порошка класса —40 мкм проходят через сито № 004 с размером сторон ячеек 40 мкм).

Продукт дробления рассеивается на рабочих ситах с номерами сеток 016 и 004 на классы при помощи классификационного аппарата — вибросита конструкции Института сверхтвердых материалов АН УССР при следующих режимах работы: частота вращения эксцентрика 140 об/мин, число ударов кулачка в минуту 280; единовременная загрузка алмаза 800 карат; время рассева 5 мин. Составляется набор из верхнего сита № 016, нижнего № 004 и поддона. В верхнее сито засыпается исходный порошок, полученный после дробления, накрывается крышкой и затем комплект, состоящий из двух сит, крышки и поддона, устанавливается на вибросито. Включается электромотор и производится рассев исходного порошка благодаря встряхиванию при помощи эксцентрикового механизма, а также вращательному движению сит. На сите № 016 остается порошок класса +160 мкм, на сите № 004 — класса —160 + 40 мкм и на поддоне — класса —40 мкм. Разработаны два типоразмера вибросит, позволяющих производить одновременный рассев на четырех и восьми ситах. Общий вид вибросита конструкции Института сверхтвердых материалов АН УССР приведен на рис. 9. Эта конструкция позволяет использовать набор сит с диаметром обечайки как 120, так и 200 мм.

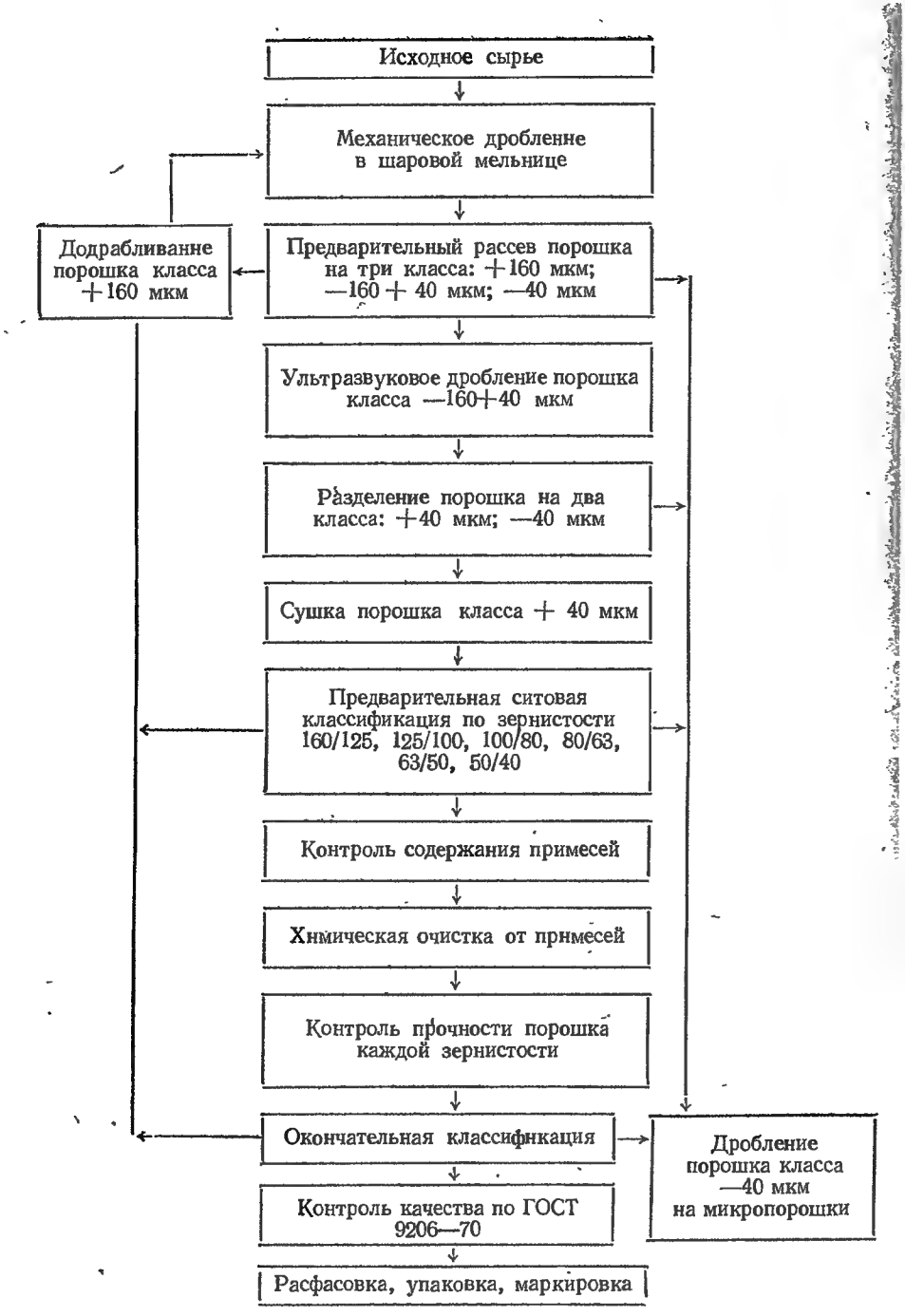


Рис. 8. Технологическая схема изготовления шлифпорошков из синтетических алмазов АСО

Порошок класса +160 мкм направляется на повторное дробление в шаровую мельницу, а класса—160 +40 мкм подвергается ультразвуковому избирательному дроблению в ваннах, подключенных к ультразвуковому генератору УЗГ-10У. Синтетические алмазы АСО можно дробить и на других типах дробилок, например, роторной дробилке непрерывного действия. Образовавшийся в результате ультразвуковой обработки и разрушения слабых, дефектных зерен класс —40 мкм отделяется методом статического осаждения в дистиллированной воде. Классификация производится многократно в химических стаканах емкостью 1000—2000 мл. Затем производится сушка полученного после классификации алмазного порошка класса —160 +40 мкм при температуре 150—200° С в течение 2—3 ч. Выделенный со сливом порошок класса —40 мкм осаждается на суперцентрифуге, сушится и соединяется с аналогичным продуктом, полученным на ситах в начале процесса. Далее порошок класса —160 +40 мкм подвергается предварительной классификации на зернистость с использованием соответствующих номеров сеток при тех же режимах работы вибросит, что и в предыдущей операции рассева. В дальнейшем все операции выполняются для каждой зернистости отдельно.

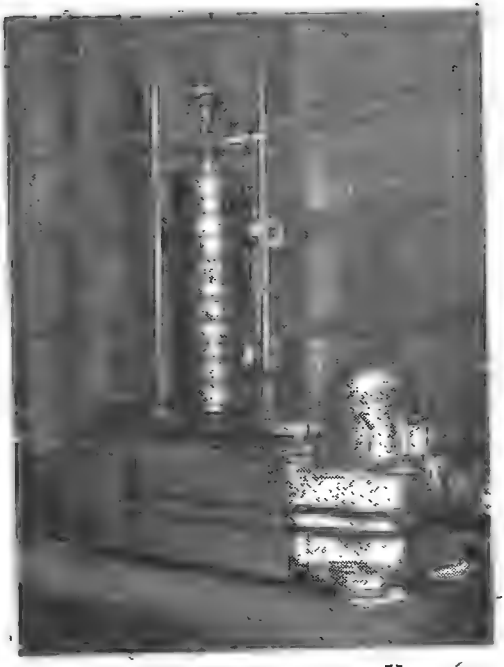


Рис. 9. Вибросито конструкции Института сверхтвердых материалов

Полученные порошки контролируются по зернистости 50/40 на содержание растворимых примесей. Если растворимые примеси превышают установленную норму, порошки подвергают химической очистке в «царской водке». Примеси образуются после операции дробления в результате намола металла из дробящих элементов и футеровки аппарата, а также металла — катализатора и графита, появившихся при раскрытии сростков в процессе дробления. Затем порошки отмывают от кислоты и сушат. После сушки проверяется прочность порошка каждой зернистости. В случае, когда прочность какого-либо порошка меньше предусмотренной стандартом, этот порошок подвергают повторному дроблению с последующей отмывкой, сушкой и классификацией по зернистости.

Порошки, удовлетворяющие нормам прочности (после предварительного контроля), направляют на окончательную ситовую клас-

сификацию на виброситах при единовременной загрузке 200 каратов при использовании сит диаметром 120 мм и 500 каратов при использовании сит диаметром 200 мм. Продолжительность классификации 10 мин. С целью доводки до кондиции по содержанию необходимого процента основной, крупной и мелкой фракций для каждого номера зернистости берутся соответствующие два сита с размерами ячеек, совпадающими с верхним и нижним размерами зерен основной фракции, вставляются в поддон, в верхнее сито насыпается порошок и все это накрывается крышкой. Затем производится классификация на вибросите. Зерновой состав полученных порошков каждой зернистости контролируется методом ситового анализа. Производится также окончательный контроль прочности порошков и содержания в них влаги.

С увеличением прочности и крупности зерен алмазов возрастает и их стоимость. Поэтому при разработке технологического процесса изготовления порошков АСР, АСВ, АСК и АСС и разработке для этой цели оборудования ставится задача обеспечения максимального выхода крупных фракций зерен и минимального выхода класса —40 мкм, так как шлифпорошки указанных марок, особенно крупнозернистые, являются более дефицитными. Для повышения однородности зерен шлифпорошков АСР, АСВ, АСК и АСС по прочности и форме зерен в технологический процесс изготовления включены операции овализации и разделения зерен порошков по форме на вибростолах.

На рис. 10 приведена технологическая схема изготовления шлифпорошков марки АСВ зернистостью 400/315 и ниже, которая учитывает физико-механические свойства синтетических алмазов высокой прочности. Процесс изготовления шлифпорошков данных марок на заводах отрасли не имеет принципиальных отличий. Имеются лишь некоторые различия по типажу применяемого оборудования.

При работе по технологической схеме, приведенной на рис. 10, исходные сростки синтетических алмазов марки АСВ (АСР; АСК, АСС) дробят на модернизированной роторной (молотковой) дробилке типа МЛА-3. Дробилка (рис. 11) работает по принципу непрерывного действия при единовременной загрузке в бункер около 4000 каратов исходного алмаза. Производительность дробилки около 60 тыс. каратов в час.

Дробление алмазов в роторной дробилке осуществляется вращающимися в помольной камере молотками. Скорость вращения молотков определяет эффективность дробления алмазов. Наряду с высокой производительностью дробилка обеспечивает получение продукта дробления, отличающегося изометричностью зерен при сравнительно низком выходе класса —40 мкм (не более 10%).

Как показано на схеме (рис. 10) после предварительного рассева сырья на классы —40 мкм; +40 —160 мкм и +160 мкм производят механическое дробление порошка класса +160 мкм. Полученный в результате дробления порошок вновь разделяют на три класса: +400 мкм; —400 +160 мкм; —160 мкм. Затем порошки классов +40 —160 мкм и —160 мкм подвергают овализации в шаровой мель-

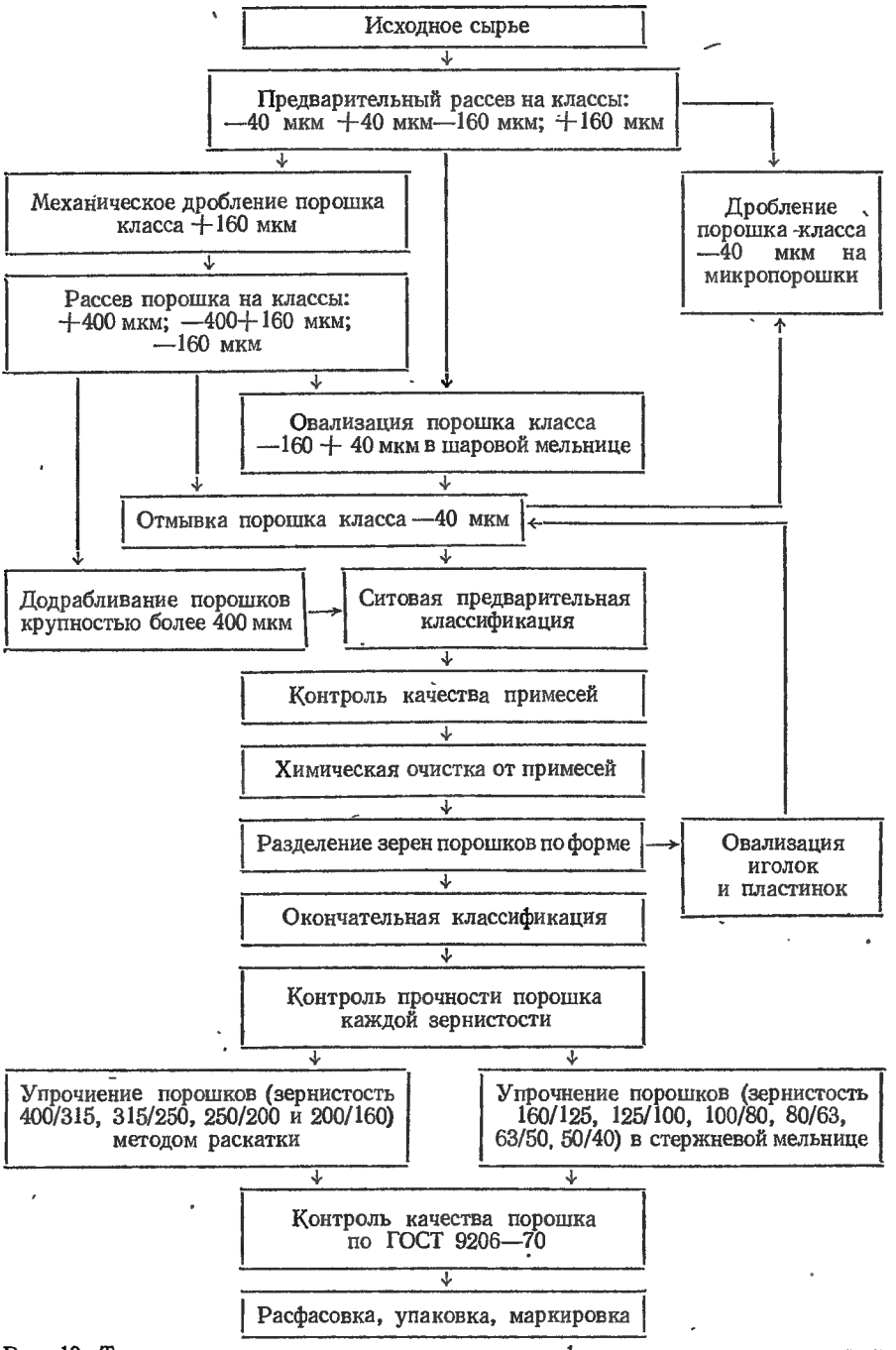


Рис. 10. Техиологическан схема изготовления шлифпорошков из синтетических алмазов АСВ

Рис. 11. Помольная камера молотковой дробилки

Рис. 12. Вибрационный стол для разделения зерен алмазных порошков по форме

нице. Овализованный порошок и порошок класса —400 +160 мкм проходят операцию отмывки для отделения частиц меньших 60—40 мкм. После отмывки следует операция предварительной ситовой классификации на виброситах по зернистостям.

Далее в соответствии с приведенной схемой все операции выполняются для каждой зернистости раздельно.

С целью повышения однородности зернового состава зерна порошков разделяют по форме на вибрационных столах, изготовленных по изобретению советского ученого Д. А. Плисс (рис. 12). Принцип разделения заключается в различии движений по вибрирующей наклонной деке алмазных зерен, имеющих разные коэффициенты трения по материалу покрытия деки.

Для сепарации зерен, отличающихся по форме, следует равномерно подавать на вибродеку при помощи питателя узкоклассифицированный на ситах исходный порошок и подбирать оптимальные продольный и поперечный углы, при которых зерна образуют на поверхности вибродеки наиболее широкий веер. При этом с верхнего края вибродеки будут сползать плоские и игольчатые зерна, с нижнего — округленные, а с боковой кромки — зерна угловатой формы. Д. А. Плисс рекомендует разделение зернистых материалов по форме зерен проводить при работе вибростола в режиме без отрыва зерен от поверхности деки, а по крупности — в режиме с отрывом. В зависимости от зернистости разделяемого на вибростоле шлифпорошка (500/400—50/40) поперечный и продольный углы наклона деки изменяются соответственно от 13 до 22° и от 9,5 до 23°.

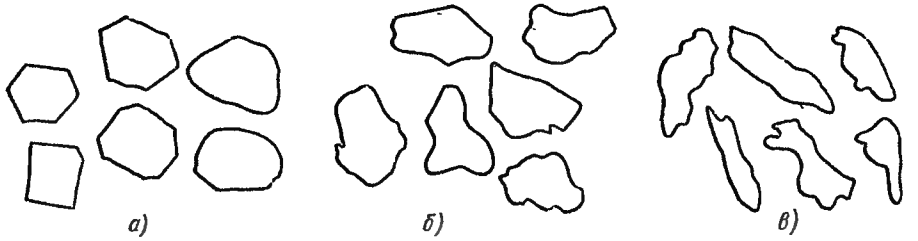


Рис. 13. Контуры зерен синтетических алмазов, разделенных по форме: *а* — округлые; *б* — угловатые; *в* — игольчатые и пластинчатые

После включения вибростола и соответствующей регулировки параметров «вибрации» деки и питателя исходный порошок из бункера поступает на деку и разделяется в зависимости от формы зерен по ячейкам. Игольчатые и пластинчатые зерна, выход которых составляет в среднем 3—5%, дробятся в шаровой мельнице повторно или используются для изготовления специальных видов инструмента.

Порошки с округленной и угловатой формой зерен поступают на окончательную классификацию, определение зернового состава, прочности и влаги и, при условии удовлетворения техническим требованиям, расфасовываются, упаковываются и маркируются. Схема изготовления шлифпорошков марки АСС, наряду с указанными выше операциями, предусматривает перечистку порошка из первых двух ячеек и затем двухкратную перечистку порошка первой ячейки на подобранных для каждой зернистости параметрах работы вибростола. Порошки из синтетических алмазов марок АСК и АСС делятся по форме на округлые (рис. 13, *а*), угловатые (рис. 13, *б*), игольчатые и пластинчатые (рис. 13, *в*).

Технология изготовления микропорошков

Исходным сырьем для изготовления микропорошков является полученный после рассева шлифпорошков на ситах класс с крупностью зерен менее 40 мкм, что соответствует классу —60 мкм при микроскопическом методе анализа.

Технология производства микропорошков предусматривает проведение следующих основных операций: измельчение исходного порошка класса —60 мкм; химическую очистку, отмывку от кислоты, сушку; предварительную классификацию порошков на зернистость; окончательную классификацию порошков на зернистость (доводку); отмывку от желатины; контроль зернового состава, абразивной способности, шероховатости обработанной порошками поверхности образцов, примесей, влажности.

Основным аппаратом, применяемым для измельчения исходного порошка класса —60 мкм, является электромагнитная мельница с центральным ротором. Электромагнитная мельница наряду с вы-

Рис. 14. Классификационная центрифуга ЦК-3

сокой производительностью (около 25 тыс. каратов в час по машинному времени) обеспечивает получение равномерного выхода требуемых классов (зернистостей) порошков с частицами 60—1 мкм при минимальном переизмельчении. Конструкция мельницы обеспечивает управляемость процесса измельчения, т. е. получение повышенного выхода заданных зернистостей порошков.

Химическая очистка продукта измельчения от намола металла, графита и катализаторов производится в 72%-ной хлорной кислоте ($HClO_4$). Навески алмаза по 1000 каратов помещают в трехлитровые конические колбы и заливают 300 мл хлорной кислоты. Смесь кипятят при периодическом помешивании до прекращения реакции и приобретения жидкостью темно-красного цвета маслянистого вида. После охлаждения отстоявшуюся кислоту сливают, а порошок промывают горячей дистиллированной водой до нейтральной реакции промывных вод. Затем порошок сушат в сушильном шкафу при температуре 150—200° С в течение 2—3 ч. Для определения потерь при химической очистке и отмывке от кислоты порошки взвешивают. Далее производится контроль порошков на содержание несгораемых примесей. Если содержание примесей в порошках превышает 2,5%, то порошки повторно направляют на химическую обработку.

Предварительное отделение порошка зернистостью 60/40 производится методом статического осаждения в химических стаканах емкостью 2000 мл. Раствор, в котором содержатся порошки зернистостью от 40/28 до 5/3, классифицируют на центрифугах типа ЦК-3 и ЦК-4, последовательно отделяя вначале более крупные, а затем все более мелкие зерна. Классификация производится в желатиновом растворе. Рекомендуемые технологические режимы классификации рассчитываются по формулам и уточняются экспериментально.

Центрифуги типа ЦК не имеют принципиальных конструктивных отличий между собой. Емкость четырех стаканов центрифуги ЦК-3 (рис. 14) составляет 2 л, центрифуги ЦК-4 — 4 л. Фактор разделения стаканчиковых центрифуг типа ЦК-3 и ЦК-4 в зависимости от частоты вращения ротора составляет 9 (при 240 об/мин), 36 (при 465 об/мин) и 150 (при 930 об/мин). Алмазный порошок, взвешенный в жидкости, осаждается под действием центробежных сил, развиваемых при вращении ротора со стаканами.

Осаждение зерен той или иной фракции обуславливается заданием соответствующего времени центрифугирования, высотой столба

жидкости, плотностью суспензии, крупностью частиц. На время центрифугирования в большой степени влияет ускорение центробежного поля. На практике удобно рассматривать не указанную величину, а ее безразмерное отношение к ускорению свободного падения. Это отношение, характеризующее напряженность силового центробежного поля, называется фактором разделения и определяется по формуле

$$F_r = \frac{\omega^2 R}{g},$$

где ω — угловая частота вращения ротора;

$$\omega = \frac{\pi n}{30} c^{-1};$$

R — радиус ротора центрифуги в м (в стаканчиковых центрифугах более правильно принимать расстояние от оси вращения до мениска столба жидкости);
g — ускорение свободного падения в м/с^2;
n — частота вращения ротора в об/мин.

Фактор разделения показывает, во сколько раз ускорение центробежного поля, развиваемого в данной центрифуге, больше ускорения гравитационного поля.

В результате предварительной классификации по зернистостям получаются порошки классов: 60—40 мкм, 40—28 мкм, 28—20 мкм, 20—14 мкм, 14—10 мкм, 10—7 мкм, 7—5 мкм, которые еще содержат значительный процент зерен смежных классов, не допустимый для порошков соответствующей зернистости. Класс меньше — 3 мкм выделяется в виде разбавленной суспензии. Окончательная классификация порошков по зернистостям до норм зернового состава, удовлетворяющим техническим требованиям ГОСТа, производится для зернистости 60/40 методом статического осаждения в химических стаканах, а для зернистостей 40/28—5/3 — методом центрифугирования на центрифугах ЦК-3 и ЦК-4.

Оставшиеся после окончательной классификации порошков на отдельные зернистости крупные остатки классов +60 мкм, +40 мкм, +28 мкм, +14 мкм, +10 мкм и другие направляются на повторное дробление. Суспензия с крупностью частиц —3 мкм осаждается на суперцентрифуге типа С-44М (частота вращения 25 000 об/мин, производительность по исходной суспензии 12—15 л/ч). Заполнение ротора осадком не должно превышать 30—40% его объема. Фугат суперцентрифуги, содержащий частицы порошка размером меньше —0,7 мкм, поступает в отделение изготовления субмикропорошков. Осадок из ротора выгружают, разбавляют в дистиллированной воде и подают на окончательную классификацию на стаканчиковых центрифугах с целью получения зернистостей 3/2, 2/1, 1/0. Готовые порошки отмывают от желатины в горячей дистиллированной воде на стаканчиковых центрифугах ЦК или LU (производства ВНР) и сушат при температуре 180—200° С.

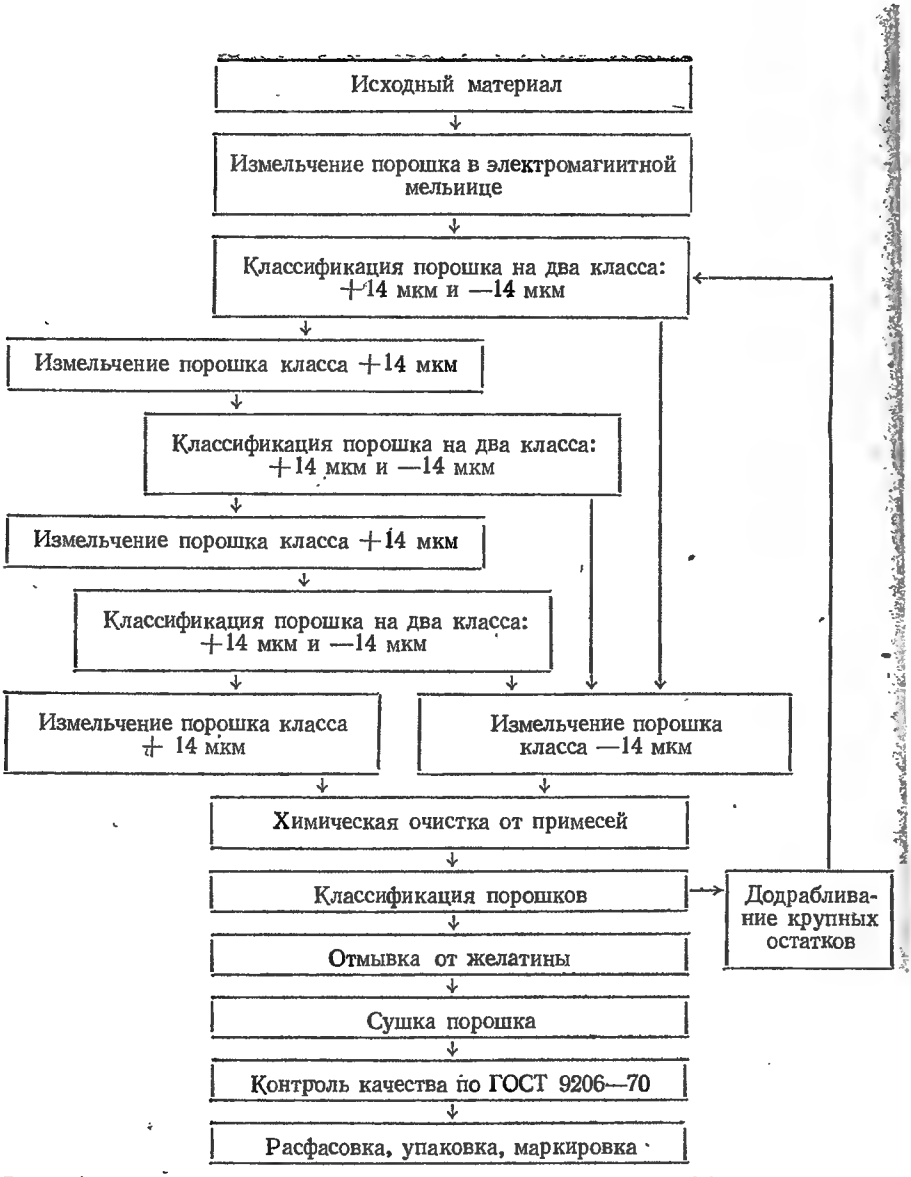


Рис. 15. Технологическая схема изготовления микропорошков АСН

Отличительной особенностью производства микропорошков АСН от микропорошков АСМ является многостадийность измельчения и классификации исходного алмазного порошка (рис. 15). Дополнительно предусматривается классификация продукта, получаемого после каждой стадии измельчения, на классы +14 мкм и —14 мкм (проводится 2—3 стадии), измельчение класса +14 мкм и однократное измельчение полученного суммарного класса —14 мкм при соответственно подобранных режимах. Такая схема позволяет получать

зерна округлой формы при минимальном содержании дефектных зерен. Однако выход порошков мелких зернистостей (5/3, 3/2, 2/1, 1/0) при этом возрастает.

Исходным сырьем для изготовления субмикропорошков является порошок класса мельче 0,7 мкм, который подвергается классификации на зернистости методом суперцентрифугирования на суперцентрифугах С-100 (рис. 16), С-44М, FS-45 и высокооборотных стаканчиковых центрифугах ЦК-5 или LU-411 при частоте вращения ротора 2500—3500 об/мин. Емкость четырех стаканов этих центрифуг составляет соответственно 4 и 1,5—2 л.

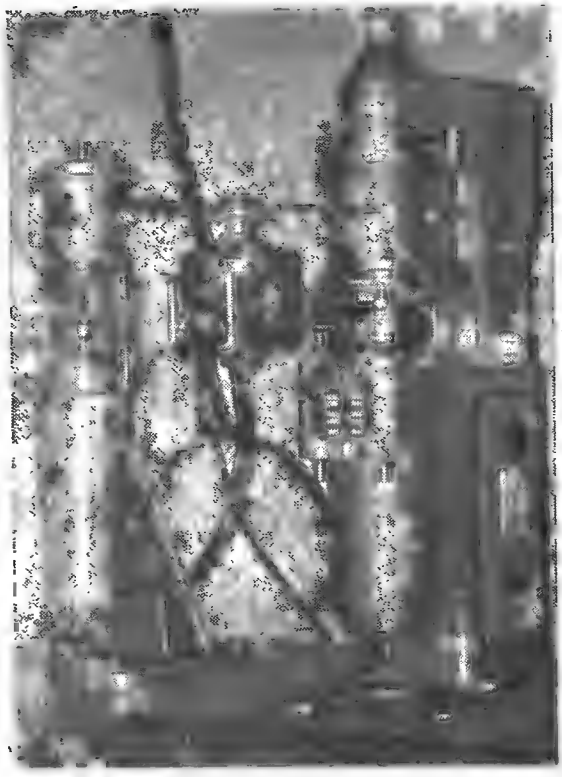


Рис. 16. Суперцентрифуги, применяемые для классификации алмазных субмикропорошков

Полученные в результате классификаций субмикропорошки АСМ 0,7/0; АСМ 0,5/0; АСМ 0,3/0 и АСМ 0,1/0 контролируют на соответствие нормам зернового состава при помощи электронного микроскопа при 10 000-кратном увеличении, на содержание влаги, примесей по несгораемому остатку, шероховатости поверхности образцов из кремния, обработанных порошками и съем материалов (в мкм/мин).

Готовые шлифпорошки, микропорошки и субмикропорошки расфасовывают на аналитических весах АДВ-200М, упаковывают в прозрачные пластмассовые или стеклянные емкости и маркируют в соответствии с техническими требованиями. Стеклянные флаконы закрывают полиэтиленовой пленкой, резиновой пробкой и алюминиевым колпачком. Завальцовка производится на полуавтомате для закатки колпачков, имеющем производительность 4000 шт/ч. Флаконы с порошками упаковывают в коробки из пенопласта или картона, рассчитанные на 1, 2, 4, 6, 10 штук. Чтобы флаконы в коробке не перемещались, их обертывают бумагой или ватой.

Металлизация порошков

Одним из существенных факторов повышения эффективности работ алмазного абразивного инструмента является применение металлизированных алмазных порошков. Металлизация алмазов повышает прочность удержания зерен в связке и способствует отводу тепла. Покрытие создает оболочку вокруг зерна, которая механически охватывает зерно и благодаря своей жесткости и пластичности мешает выпаданию зерен и их осколков из связки. Для металлизации алмазов используют различные способы нанесения покрытий: электролитический, вакуумный из жидкой фазы, карбонильный и др. Наиболее распространен электролитический способ, при котором каждая частица алмазного порошка покрыта металлической пленкой. Нанесение металлических покрытий на поверхность алмазных зерен происходит при прохождении постоянного электрического тока через проводящие ток растворы.

Гальванотехническая система представляет собой электролитическую цепь, состоящую из электродов (катода и анода) и электролита, содержащего ионы металла, например раствор солей в воде. При растворении солей в воде кристаллическая решетка разрушается и ионы переходят в раствор — происходит электролитическая диссоциация. Примером может служить диссоциация в водных растворах сернокислого натрия:

$$Na_2SO_4 \rightleftarrows 2Na^+ + SO_4^{2-}.$$

Отрицательные ионы, образующиеся в результате электролитической диссоциации, имеют избыточные электроны, а у положительных их не хватает.

Электрические заряды ионов солей, растворимых в водном растворе, делают раствор электролита электропроводным. Постоянный ток подводится при помощи электродов — анода и катода. Ионы растворенных солей при прохождении постоянного тока через раствор движутся в нем в соответствии с законом электростатического притяжения. Отрицательно заряженные ионы (анионы) притягиваются к положительно заряженному электроду, а ионы, несущие положительные заряды (катионы) — к отрицательному электроду. Таким образом происходит осаждение металла на катоде, которым является дно ванны с покрываемым алмазным порошком.

Технология металлизации порошков электролитическим способом имеет такие недостатки, как длительность процесса осаждения металлов, неоднородность покрытия и др.

В Институте сверхтвердых материалов разработан нашедший практическое применение новый способ электролитического нанесения металлических покрытий. Он заключается в том, что процесс металлизации алмазов и других абразивных материалов производят с наложением ультразвуковых колебаний с частотой 880—3000 кГц.

Металлизация алмазов никелем осуществляется в два этапа. Вначале создается электропроводящий слой на поверхности каждого

зерна путем химического никелирования, а затем электролитическим способом осаждается металл из электролита, содержащего соли никеля и борную кислоту (сернокислый никель — 350 г/л, хлористый никель — 50 г/л, борная кислота — 30 г/л). Температура электролита 50—70° С. Анод состоит из того же металла, который следует осаждать. При включении тока он начинает растворяться и в раствор переходят положительно заряженные частицы металла (катионы) взамен выделяющихся на катоде. Ультразвуковое поле выравнивает концентрацию ионов электролита у электродов, уменьшает степень поляризации и содействует энергичному удалению пузырьков газа с поверхности электродов. Проведение электролитического процесса в ультразвуковом поле обеспечивает хорошую адгезию металлического покрытия к алмазному зерну и сокращение цикла нанесения металла.

Как показали исследования, работоспособность кругов на органической и металлической связках, изготовленных с применением металлизированных никелем порошков из синтетических алмазов, повышается в среднем в 2—3 раза. Данный способ позволяет осуществлять металлизацию порошков и другими металлами, например медью.

Практическое применение имеет также способ металлизации зерен алмазных порошков марки АСО жидким металлическим расплавом. Для этой цели применяют медно-серебрянно-титановый сплав и другие композиции с хорошими адгезионными и капиллярными свойствами по отношению к алмазу. Технология металлизации алмаза адгезионным способом заключается в спекании свободно насыпанной смеси алмазных и металлических порошков в вакууме в присутствии жидкой фазы. После охлаждения получают пористый продукт, который дробят до полного или частичного отделения металлизированных зерен друг от друга. В результате дробления могут быть получены частицы в виде агрегатов, состоящих из нескольких алмазных зерен, спаянных друг с другом и покрытых адгезионно-активным к алмазу металлическим сплавом. Применение агрегированных алмазных порошков позволяет увеличить прочность закрепления алмазов в кругах на органической связке благодаря вовлечению в работу по их удержанию большего объема материала связки, что в конечном итоге позволяет снизить износ инструмента.

Масса металлического покрытия определяется в процентах от массы исходного алмазного порошка, принимаемого за 100%, и, как правило, составляет 25, 50, 75 и 100%. Зернистость металлизированных порошков следует обозначать путем добавления к марке алмаза буквы М. Контроль количества металла покрытия производится следующим образом. Навеска металлизированного порошка массой 0,2 г обрабатывается 50 мл азотной кислоты (1 : 1) при нагревании до температуры 70 ± 10° С. После полного растворения металла добавляют 50 мл горячей дистиллированной воды, фильтруют и промывают 6—7 раз. Промытые порошки осторожно смывают с фильтра в заранее взвешенный стакан, сушат при температуре 105 ± 5° С и взвешивают с точностью до 0,0002 г. Содержание

металлического покрытия порошка в процентах, отнесенное к массе порошка без покрытия, определяется по формуле

$$A = \frac{(a - б)\,100}{б},$$

где a — навеска металлизированного порошка в г;

$б$ — масса порошка после обработки кислотой в г.

Металлизированные порошки расфасовывают и упаковывают так же, как и обычные порошки из синтетических алмазов с учетом дополнительной массы металла. Например, чтобы взвесить 100 каратов алмазов с 50%-ным содержанием металла, необходимо взвесить 150 каратов металлизированного порошка.

Контроль качества порошков

Показатели качества. При контроле качества алмазных порошков определяется зерновой состав, прочность (для шлифпорошков из синтетических алмазов), абразивная способность алмазных микропорошков и шероховатость обработанной ими поверхности, содержание примесей в шлифпорошках и в микропорошках, а также влажность. Контроль производится как при изготовлении, так и при использовании порошков у потребителей по единым методикам, предусмотренным ГОСТ 9206—70.

Прочность зерен шлифпорошков из синтетических алмазов согласно ГОСТ 9206—70 определяется методом статического разрушения единичных зерен при одноосном сжатии. Гарантированные нормы прочности шлифпорошков в зависимости от их марки и зернистости приведены на рис. 17.

Абразивная способность алмазных микропорошков выражается отношением массы сошлифованного корунда к массе израсходованного микропорошка при установленном режиме испытания. По износостойкости алмаз оставляет все известные абразивные материалы далеко позади и превосходит их в тысячи и десятки тысяч раз. Так, одним килограммом синтетического алмаза можно сошлифовать: 2,2 т твердого сплава ВК15, 11 т кислотоупорного фарфора, 35 т чугуна, 100 т стекла.

На рис. 18 показаны гарантированные нормы абразивной способности микропорошков АСМ и АСН в зависимости от их зернистости. Как видно из графиков, абразивная способность микропорошка АСН выше абразивной способности микропорошка АСМ в среднем на 30—40% (в зависимости от зернистости). Средняя абразивная способность микропорошков марки АСН значительно выше абразивной способности микропорошков из природных алмазов, полученных по обычной технологии.

Испытание микропорошков на шероховатость обработанной ими поверхности производится при ручной и механической обработке твердого сплава марки ВК6 или Т15К6. Субмикропорошки, так же как и микропорошки, проходят обязательную проверку на абразивную способность и шероховатость обработанной поверхности. Ве-

личина снятого (сполированного) за единицу времени слоя образца монокристалла кремния любой марки в зависимости от зернистости субмикропорошка должна соответствовать следующим данным:

Зернистость	Съем в мкм/мин, не менее
0,7/0	0,35
0,5/0	0,25
0,3/0	0,15

При этом шероховатость поверхности образцов должна быть не грубее 14-го класса, т. е. субмикропорошки должны обеспечивать наивысший класс шероховатости обрабатываемой поверхности.

Масса растворимых примесей в природных и синтетических шлифпорошках не должна превышать 1,5%. Примеси проверяются по зернистости 50/40 или другому самому мелкому порошку в данной партии, поскольку в мелких порошках, как правило, находится наибольшее количество примесей, чем в крупных. Масса примесей в микропорошках и субмикропорошках должна быть не более 2,5%. Содержание влаги в порошках, в том числе металлизированных, более 0,2% не допускается.

Определение зернового состава, прочности, абразивной способности и шероховатости поверхности проводится для каждой партии

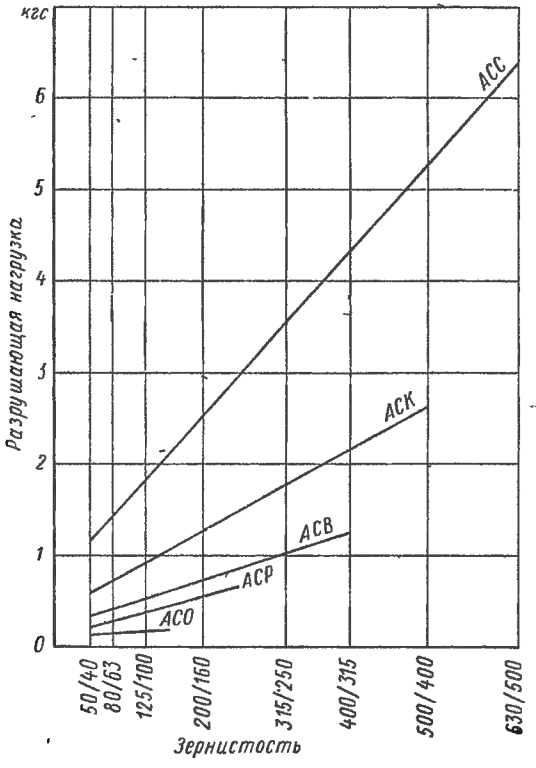
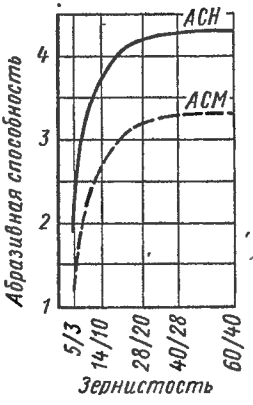


Рис. 17. Гарантированные нормы прочности шлифпорошков различных синтетических алмазов

Рис. 18. Гарантированные нормы абразивной способности микропорошков АСМ и АСН



одной зернистости: шлифпорошков — до 2 кг, микропорошков — до 0,5 кг.

Наряду с показателями качества алмазных порошков, контроль которых предусмотрен ГОСТ 9206—70, представляет значительный практический интерес определение их насыпной массы и удельной поверхности. Насыпная масса $\gamma_н$ — масса единицы объема свободно насыпанного алмазного порошка — зависит от марки, зернистости, формы зерен и плотности их укладки. Кроме насыпной массы, порошки принято характеризовать еще массой утряски $\gamma_т$ — отношением массы порошка к полученному объему после уплотнения встряхиванием. Утряска производится до установления постоянного объема, т. е. до прекращения усадки порошка. Величина насыпной массы утряски в зависимости от крупности и формы зерен порошка на 10—40% выше насыпной массы вследствие лучшей укладки частиц при встряхивании.

Насыпная масса порошков из синтетических алмазов

$$\gamma_и = \frac{G}{V} \text{ г/см}^3,$$

где G — масса навески порошка в г;

V — объем, занимаемый навеской порошка, в см³.

Таблица 10

Насыпная масса синтетических алмазов

Марка и зернистость порошка	Насыпная масса в г/см³	
	$\gamma_н$	$\gamma_т$
АСО 160/125—50/40	1,30—1,40	1,46—1,62
АСР 250/200—50/40	1,45—1,56	1,60—1,78
АСВ 400/315—50/40	1,50—1,62	1,70—1,86
АСК 500/400—80/63	1,65—1,78	1,96—2,02
АСС 630/500—125/100	1,78—1,92	1,95—2,20
АСМ 60/40—1/0	1,60—0,95	2,10—1,10

Насыпная масса утряски определяется по аналогичной формуле (табл. 10). Величина, обратная насыпной массе, называется насыпным объемом

$$V_и = \frac{1}{\gamma_я}; \quad V_т = \frac{1}{\gamma_т}.$$

Зная насыпную массу $\gamma_н$, насыпной объем $V_н$ и плотность материала (для алмаза $\gamma_к = 3{,}52$ г/см³), можно рассчитать другие объемные характеристики порошка:

относительный объем

$$\beta = \frac{V_н}{V_к} = \frac{\gamma_к}{\gamma_н};$$

относительная плотность

$$\tau = \frac{\gamma_н}{\gamma_к} = \frac{1}{\beta};$$

пористость

$$\varepsilon = \frac{V_н - V_к}{V_и} = \frac{\gamma_к - \gamma_н}{\gamma_к} = 1 - \frac{\gamma_н}{\gamma_к}.$$

Относительный объем показывает, во сколько раз насыпной объем порошка больше удельного объема компактного материала Отно-

сительная плотность характеризует долю объема, занимаемого порами в порошке. Относительная плотность и пористость выражаются либо в долях единиц, либо в процентах (тогда отношение соответствующих величин умножают на 100). Знание величины насыпной массы (объема) необходимо, например, при расчете объема дозаторов шихты при изготовлении алмазного инструмента.

Многие технологические процессы, в том числе и при производстве алмазного инструмента, определяются удельной поверхностью реагирующих фаз, поскольку их скорость пропорциональна доступной поверхности. На основании теории Б. В. Дерягина в Институте физической химии АН УССР был создан новый прибор ДУП-2 (Дерягин, удельная поверхность, модель 2), пригодный для контроля удельной поверхности алмазных порошков и порошков других сверхтвердых материалов. Он предназначен для определения внешней удельной поверхности непористых порошкообразных материалов, в частности алмазных порошков в диапазоне выпускаемых зернистостей 0,1/0—400/315.

Удельная поверхность, получаемая на приборе ДУП-2, для субмикропорошков составляет 12 (0,7/0)—18 (0,3/0) м²/г, для микропорошков — от 0,15—0,18 (60/40) до 11,2—11,6 (1/0).

Для шлифпорошков удельная поверхность составляет:

Марка шлифпорошка	Удельная поверхность в м²/г
АСО	0,16 (50/40)—0,06 (160/125)
АСР	0,12 (50/40)—0,03 (250/200)
АСВ	0,11 (50/40)—0,02 (400/315)
АСК	0,10 (50/40)—0,015 (400/315)
АСС	0,09 (50/40)—0,01 (400/315)

Определение зернового состава. Ситовой анализ зернового состава шлифпорошков проводится с помощью механического вибросита СММ Ленинградского завода «Редуктор» или конструкции Института сверхтвердых материалов, специально созданной для этой цели, и комплекта контрольных сит диаметром 120 мм (с крышкой и поддоном).

Для анализа берут сокращенную пробу порошка массой 20 г. Из комплекта отбирают четыре контрольных сита, а для порошков зернистостью 63/40 и 50/40 — три сита. Сита, необходимые для анализа порошка данной зернистости, собирают в стопку по убывающему номеру сетки, вставляют нижнее сито в поддон, а на верхнее помещают навеску для анализа, закрывают его крышкой и устанавливают на вибросито. Время рассева для всех зернистостей устанавливается равным 10 мин. Полученный после рассева на ситах порошок последовательно, начиная с верхнего сита, ссыпают и взвешивают на аналитических весах АДВ-200-М с точностью до 0,02 г. При частичной задержке зерен на сите допускается легкое постукивание или очистка внутренней поверхности сита волосяной кисточкой. Полученные результаты ситового анализа округляют до 1%.

Контроль зернового состава микропорошков производится с помощью микроскопа МБР-1 (МБР-3) или МБИ-6 при 600—1800-кратном увеличении. Для проведения испытаний от сокращенной пробы порошка массой 1 г отбирают навеску около 1 мг и готовят препарат

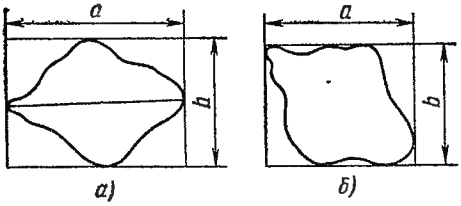


Рис. 19. Определение размера зерна методом микроскопического анализа:

а — правильно; *б* — неправильно

для проведения микроскопического анализа. Для порошков зернистостью 60/40—14/10 препарат готовят путем нанесения порошка на предметное стекло. Зерна порошка разравнивают в один слой и накрывают покровным стеклом. Затем с помощью капельницы или пипетки вводят между стеклами каплю иммерсионной жидкости.

Препарат для проведения микроскопического анализа порошков зернистостью 10/7—1/0 готовят путем внесения порошка в каплю иммерсионной жидкости, помещенной на предметное стекло. Затем препарат накрывают покрывным стеклом и излишек жидкости удаляют с помощью промокательной бумаги. Зерна в препарате должны быть распределены равномерно, не перекрывая друг друга. Увеличение микроскопа в зависимости от зернистости порошка подбирают таким, чтобы цена деления окулярной сетки составляла:

5 ± 0,5 мкм для зернистости 60/40—20/14;

3 ± 0,3 мкм для зернистости 14/10—7/5;

1 ± 0,15 мкм для зернистости 5/3—1/0.

За размер принимается полусумма сторон *а* и *b* прямоугольника, описанного вокруг проекции зерна таким образом, чтобы бо́льшая сторона прямоугольника *а* соответствовала наибольшей длине проекции зерна (рис. 19).

Измерение выполняется с точностью до половины деления шкалы. Определение размера и подсчет просмотренных зерен порошка выполняют последовательно в нескольких полях зрения микроскопа, передвигая предметное стекло с препаратом в таком направлении, чтобы исключалось повторное измерение и подсчет. Просмотр под микроскопом начинают с измерения крупных зерен по всему препарату. При наличии зерен, превышающих допустимый размер, анализ прекращают и порошок считают не соответствующим норме. При отсутствии вышеуказанных зерен производят подсчет количества зерен крупной, основной и мелкой фракций. Количество измеренных зерен в одном препарате должно быть не менее 500 шт.

Определение прочности алмазных шлифпорошков производится на приборах и установках, обеспечивающих возможность определения разрушающей нагрузки одиночных зерен при одноосном сжатии их между корундовыми пластинками плавно возрастающей нагрузкой. Для этой цели применяют прибор ДА-2 с автоматическим нагружением зерна, прекращением этого нагружения в момент разрушения зерна и фиксацией разрушающей нагрузки (рис. 20).

Для определения разрушающих нагрузок, превышающих 4,5 кгс, при контроле алмазов АСС применяется разрывная машина РМ30, оборудованная для получения сжимающих сил. Прочность шлифпорошка определяется по результатам последовательного разрушения 50-ти зерен. По величинам разрушающих нагрузок P_1—P_{50}

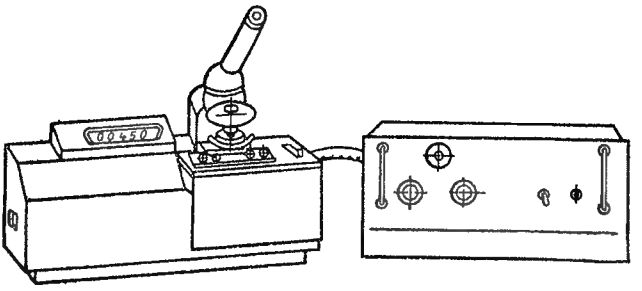


Рис. 20. Прибор ДА-2 для контроля прочности

определяют их среднюю величину $P_{ср}$. Значения разрушающих нагрузок, превышающие удвоенную величину $P_{ср}$, из расчета исключают, и прочность зерен порошка P окончательно определяют по формуле

$$P = \frac{\sum_{1}^{50} P_i - \sum_{1}^{n} P_i}{50 - n} \text{ гс},$$

где n — количество зерен, разрушившихся при нагрузке, превышающей величину $2P_{ср}$, и не принимаемых в расчет.

Определение абразивной способности микропорошков выполняют на установке УАС-2М (рис. 21), представляющей собой настольный плоскошлифовальный станок с горизонтально расположенной планшайбой из керамики 22ХС диаметром 110 мм. По поверхности планшайбы, вращающейся с частотой 100 об/мин возвратно-поступательно (60 дв. ход/мин), не доходя 5 мм до края планшайбы, перемещается блок с шлифуемыми образцами. Образцы представляют собой прямоугольные призмы из синтетического корунда с основанием 10 × × 10 мм, параллельным оптической оси.

Одновременно шлифуется три образца, укрепленных по краям стального диска (блока) диаметром 50 мм на равном расстоянии

Рис. 21. Установка типа УАС-2М для определения абразивной способности алмазных микропорошков

друг от друга. Предварительно взвешенный блок с образцами прижимается к планшайбе грузом массой 2 кг. Образцы шлифуются навеской порошка в 10 мг, помещенной перед испытанием на середину планшайбы и смоченной десятью каплями веретенного масла. После 60 мин шлифования блок с образцами промывают бензином, сушат и взвешивают на аналитических весах для определения убыли массы образцов. Отработанную суспензию после испытания удаляют с планшайбы ватой, смоченной бензином. Абразивная способность порошка

$$A = \frac{П_1 - П_2}{П},$$

где $П$ — навеска порошка в г;

$П_1$ — масса блока с образцами до испытания в г;

$П_2$ — масса блока с образцами после испытания в г.

Порошок испытывают 2 раза и определяют среднее значение A.

Испытание микропорошков на шероховатость обработанной поверхности может производиться механическим или ручным способами, причем для каждого из указанных способов для различных зернистостей порошков в ГОСТ 9206—70 приводятся соответствующие нормы шероховатости поверхности обрабатываемых образцов.

При испытании на шероховатость механическим методом используется установка УАС-2М с планшайбой диаметром 110 мм из стали 10, толщиной не более 15 мм. Образец, подвергаемый обработке, изготовляют из твердого сплава Т15К6 в виде цилиндра или прямоугольной призмы с площадью основания 100 мм² и высотой не более 6 мм. На заранее подготовленную поверхность планшайбы наносят навеску порошка массой 0,001 г и одну каплю эмульсии следующего состава в весовых частях: керосин — 1, бензин — 1, стеарин — 0,2. Порошок равномерно распределяют по рабочей поверхности планшайбы с помощью твердосплавной пластинки. Затем вставляют блок с образцами в обойму, нагружают их грузом и в течение 2 мин доводят образцы порошками. В процессе доводки через 1 мин добавляют каплю эмульсии.

Шероховатость поверхности образца и планшайбы выше 9а класса следует измерять на двойном микроскопе Линника МИИ-1, а равной или менее 9а класса — на микроинтерферометре МИИ-4 или профилографе-профилометре блочной конструкции с радиусом закругления иглы не более 2 мкм. Допускается применение других приборов, предназначенных для измерения необходимой шероховатости поверхности.

При ручном методе применяют притиры с размером рабочей поверхности 200 × 100 мм из серого мелкозернистого чугуна СЧ 18-36, образец — из твердого сплава Т15К6 или ВК6 в виде цилиндра или прямоугольной призмы с площадью основания 700 мм² и высотой не более 10 мм.

Определение содержания примесей и влаги в порошках заключается в определении количества примесей: в шлифпорошках — по

массе растворимых компонентов, в микропорошках и субмикропорошках — по массе несгораемого остатка.

Химический анализ проводится для каждой партии без разделения по зернистостям: шлифпорошков до 20 кг, микропорошков до 5 кг, изготовленных из алмазов одного режима синтеза или природных алмазов одной группы. Примесями в порошках из синтетических алмазов являются металлы-катализаторы и их карбиды, неперекристаллизовавшийся графит и внесенные в процессе дробления частицы стали. Эти примеси полностью растворяются только в хлорной кислоте. Суммарное количество растворимых примесей определяется обработкой навески анализируемого порошка хлорной кислотой в течение 2—3 ч при постоянном кипении. Последующее промывание и сушка порошка должны проводиться без потерь. Точность взвешивания — до 0,0002 г. Разность в массе навески порошка до и после кислотной обработки, отнесенная к массе навески анализируемого порошка, представляет собой содержание растворимых примесей в шлифпорошке данной партии. Суммарное количество примесей в алмазных порошках наиболее точно отражает фактическое наличие примесей.

Из-за длительности процесса оседания мелких частичек алмаза и их слабой смачиваемости определение примесей в микропорошках производится косвенно, по величине несгораемого остатка, представляющего собой окислы металлов, которые образуются из содержащихся в микропорошках металлов и их карбидов в процессе сжигания анализируемой навески. Навеску анализируемого микропорошка прокаливают при температуре 900° С в течение 6—8 ч до получения постоянной массы несгораемого остатка. Масса несгораемого остатка, отнесенная к массе навески анализируемого микропорошка, представляет собой количество несгораемого остатка для микропорошка данной партии (в %). Методика определения содержания влаги в порошках основывается на определении разности в массе навески порошка до сушки и после сушки при 110° С. Разность в этих массах, отнесенная к массе навески порошка до сушки, представляет содержание влаги в анализируемой навеске.

§ 4. ПОРОШКИ ИЗ КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА

Из кубического нитрида бора (кубонита и эльбора) изготовляют шлифпорошки и микропорошки, применяемые для изготовления различных абразивных инструментов и паст. Шлифпорошки кубического нитрида бора характеризуются зерновым составом, прочностью зерен, количеством примесей и влажностью. Технические требования к качеству порошков из кубонита и эльбора устанавливаются на заводах-изготовителях.

Кубонит производится на Опытном заводе Института сверхтвердых материалов АН УССР. Технология изготовления порошков из кубонита и методы испытаний их качества практически не отличаются от принятых на заводе при выпуске алмазных порошков.

Таблица 11

Зерновой состав порошков из кубонита

Зернистость	Фракция (мкм)			
	крупная		основная — должно задерживаться на сите не более 70%	мелкая — может проходить через сито не более 3%
	Должно проходить через сито 100%	Может задерживаться на сите не более 15%		
200/160	250	200	160	125
160/125	200	160	125	100
125/100	160	125	100	80
100/80	125	100	80	63
80/63	100	80	63	50
63/50	80	63	50	40
50/40	63	50	40	—

Примечания:
1. В таблице приводятся размеры ячеек сит в мкм.
2. Содержание фракций указано в % по массе.

Зернистость шлиф- и микропорошков из кубонита обозначается так же, как и из алмаза (табл. 11). Из кубонита изготовляют две марки шлифпорошков, отличающихся по прочности, — КО и КР. Порошки КО обладают развитой режущей поверхностью, повышенной хрупкостью и рекомендуются для изготовления инструментов на органической и керамической связках. Порошки КР обладают большей, чем порошки КО, прочностью и применяются для изготовления инструмента на металлических связках.

Шлифпорошки из кубонита, так же как и алмазные, выпускаются с металлическим покрытием зерен. Такое покрытие повышает эффективность применения инструмента. Специально для порошков кубонита разработано также покрытие зерен стеклом. Круги на органических связках из кубонита, покрытого стеклом, могут работать без охлаждения. Для обозначения покрытия порошков из кубонита после номера зернистости добавляется буква М — для металлизированных порошков и С — для покрытых стеклом. После буквы указывается цифра, соответствующая процентному содержанию материала покрытия по отношению к массе порошка кубонита. Например, порошок КР зернистостью 100/80 с металлическим покрытием, масса которого по отношению к массе кубонита составляет 50%, обозначается КР 100/80—М50.

Качество микропорошков из кубонита определяется зерновым составом, абразивной способностью, влажностью и массой примесей. Зерновой состав микропорошков из кубонита и методы их контроля полностью соответствуют зерновому составу и методам контроля алмазных микропорошков. Зернистость микропорошков из кубонита обозначается дробью, числителем которой является наибольший, а знаменателем — наименьший размер зерен основной фракции

Таблица 12

Зерновой состав шлифпорошков из эльбора

Зернистость	Размер зерен фракций в мкм			Зернистость	Размер зерен фракций в мкм		
	крупной	основной	мелкой		крупной	основной	мелкой
Л25	400—315	315—250	250—160	Л8	125—100	100—80	80—50
Л20	315—250	250—200	200—125	Л6	100—80	80—63	63—40
Л16	250—200	200—160	160—100	Л5	80—63	63—50	50—28
Л12	200—160	160—125	125—80	Л4	63—50	50—40	40—20
Л10	160—125	125—100	100—63				

в микрометрах. Например, в порошке КМ 40/28 размер зерен основной фракции составляет 40—28 мкм.

Абразивная способность микропорошков из кубонита определяется по той же методике и на том же оборудовании, что и для алмазных микропорошков. Образцы для испытаний на абразивную способность в этом случае изготовляют не из твердого сплава, а из закаленной стали, так как порошки из кубонита предназначены для обработки вязких материалов. Абразивная способность, полученная при испытании микропорошка из кубонита зернистостью КМ 14/10, должна быть не ниже 7. По результатам испытаний этого порошка определяется пригодность всей партии микропорошков.

Таблица 13

Зерновой состав микропорошков из эльбора

Зернистость порошков с содержанием основной фракции		Размер зерен фракции в мкм		
обычной	повышенной	крупной	основной	мелкой
ЛО-М40	ЛП-М40	50—40	40—28	28—14
ЛО-М28	ЛП-М28	40—28	28—20	20—10
ЛО-М20	ЛП-М20	28—20	20—14	14—7
ЛО-М14	ЛП-М14	20—14	14—10	10—5
ЛО-М10	ЛП-М10	14—10	10—7	7—3
ЛО-М7	ЛП-М7	10—7	7—5	5—1
ЛО-М5	ЛП-М5	7—5	5—3	3—0
ЛО-М3	—	5—3	3—1	До 1
ЛО-М1	—	3—1	До 1	—

Таблица 14

Соотношение зернистости порошков из кубонита и эльбора

Зернистость шлифпорошков		Зернистость микропорошков	
эльбор	кубонит	эльбор	кубонит
Л25	200/160	ЛМ40	40/28
Л20	160/125	ЛМ28	28/20
Л16	125/100	ЛМ20	20/14
Л12	100/80	ЛМ14	14/10
Л10	80/63	ЛМ10	10/7
Л8	63/50	ЛМ7	7/5
Л6	50/40	ЛМ5	5/3
—	—	ЛМ3	3/2
—	—	—	2/1
—	—	ЛМ1	1/0

Примечание. Зернистости шлифпорошков из эльбора Л5 и Л4 соответствуют зернистости микропорошка КМ 60/40.

Порошки из эльбора выпускаются Ленинградским абразивным заводом «Ильич». Шлифпорошки из эльбора контролируются по зерновому составу и механической прочности. Обозначение зернистости порошков из эльбора аналогично принятому для абразивных порошков. Однако в отличие от последних зерновой состав эльбора контролируется микроскопическим методом. Обозначение зернистости и зерновой состав шлифпорошков из эльбора приводятся в табл. 12.

Содержание основной фракции в шлифпорошках из эльбора (по количеству зерен) не должно быть меньше 60%, крупной — не больше 10%, мелкой — не больше 30%.

По механической прочности порошки из эльбора, так же как и из кубонита, делятся на две марки: эльбор ЛП — с повышенной механической прочностью и эльбор ЛО — с обычной механической прочностью. Механическая прочность зерен эльбора определяется по той же методике, что и зерен синтетических алмазов. Микропорошки из эльбора в зависимости от содержания основной фракции выпускаются двух марок: с повышенным — 60% и обычным — 55%. Обозначение микропорошков из эльбора и размеры фракций приводятся в табл. 13. В микропорошках эльбора ЛП содержание крупной фракции лежит в пределах 5—10% для различных зернистостей, а мелкой 30—35%. В микропорошках ЛО крупной фракции содержится 5—10%, мелкой 30—40%.

Для перевода зернистости кубонита и эльбора из одной системы обозначений в другую можно воспользоваться данными табл. 14. В основу таблицы положен принцип равенства линейных размеров зерен основной фракции.

Глава III. ПАСТЫ

§ 1. ПАСТЫ ИЗ АБРАЗИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЗЕРНЕ

В состав паст, кроме абразивного порошка, входят различные вязкие, смазывающие и поверхностно-активные вещества, способствующие удержанию на поверхности притира абразивных зерен и их равномерному распределению по этой поверхности. Они должны образовывать между обрабатываемой поверхностью и поверхностью притира смазывающую пленку, препятствующую непосредственному контакту этих поверхностей, и ускорять процесс разрушения материала обрабатываемой детали.

Связка паст должна удовлетворять следующим требованиям:

1. Обладать определенной вязкостью в зависимости от вида доводки, например, при доводке плоских поверхностей — меньшей, цилиндрических — большей.

2. Быть маслянистой, т. е. обладать способностью создавать на поверхностях притира и обрабатываемой детали твердые, граничные пленки. Наибольшей маслянистостью обладают животные жиры, наименьшей — растительные. Особое место занимает касторовое масло. Кроме маслянистости оно обладает значительной вязкостью. Минеральные масла имеют пониженную маслянистость. При их применении рекомендуется добавлять в смесь противозадирные присадки (четыреххлористый углерод и др.).

3. Обладать химической активностью. Наибольшей химической активностью обладают кислоты (олеиновая, стеариновая), наименьшей — свиное сало, парафин, воск.

По своему назначению пасты разделяют на доводочные и полировочные. Доводочные пасты содержат порошки более твердых абразивных материалов и более крупных зернистостей, чем полировочные пасты, и применяются для доводки режущих инструментов, стальных закаленных деталей, притирки конусов, форсунок, клапанов, деталей топливных насосов и др. По крупности абразивного порошка доводочные пасты делятся на три группы: грубые 20—100 мкм, средние 5—14 мкм, тонкие 1—3 мкм. Для доводочных паст применяют порошки из карбида бора, зеленого карбида кремния, электрокорунда, наждака, кварца, окиси хрома (зеленый крокус) и окиси алюминия.

Полировочные пасты содержат мелкодисперсный порошок (1 мкм) менее твердых материалов — окиси железа (красный крокус), венской извести, окиси магния, пемзы, полирита и трепела. Они

применяются для подготовки поверхности деталей под гальванические покрытия — медненные, никелированные, хромированные.

Полировочные пасты на основе окиси хрома (литые) выпускаются централизованно по ГОСТ 8217—56. В состав пасты, помимо окиси хрома, входит стеарин, парафин и олеиновая кислота. Полировочная паста наносится на хлопчатобумажные, фетровые и кожаные круги-полировальники.

Связывающую основу мазеобразных паст составляют жиры животного и растительного происхождения, мыло и продукты переработки нефти: костный жир, рыбий жир, глицерин, воск, оливковое масло, касторовое масло, стеарин, парафин, веретенное масло, вазелиновое масло, керосин, жидкое мыло (зеленое). В качестве поверхностно-активного вещества, ускоряющего процесс разрушения обрабатываемого материала, в состав большинства паст вводится олеиновая кислота. Состав пасты и соотношение компонентов зависит от конкретных условий применения паст. Обычно пасту изготовляют на тех предприятиях, где она применяется, и наивыгоднейшие составы подбираются опытным путем.

Процесс изготовления абразивных паст сводится к следующим операциям. Предварительно фильтруют все компоненты паст: жидкости — через несколько слоев марли, а твердые и густые вещества — после нагрева до разжижения. Затем в соответствии с рецептурой пасты и требуемым ее количеством отвешивают компоненты.

После разогрева до жидкого состояния компоненты пасты сливают в чистую емкость и тщательно перемешивают со ссыпаемым туда абразивным порошком. При этом следует так перемешивать и растирать смесь, чтобы исчезли слипшиеся комочки абразивного порошка. Чем меньше зернистость порошка, тем тщательнее и продолжительнее следует мешать смесь. В случае необходимости емкость со смесью может быть подогрета. После остывания смеси готовую пасту упаковывают в тубы или банки, предварительно промытые горячей водой и бензином.

При окончательных доводочно-притирочных работах широкое распространение получили пасты ГОИ (Государственного оптического института). В зависимости от номера зернистости состав грубых и средних паст ГОИ следующий: 75—85% окиси хрома, 2% силикагеля, 5—10% расщепленного жира, 5—10% стеарина, 2% керосина. В состав тонких паст дополнительно входят олеиновая кислота (2%) и двууглекислая сода (0,2%). На Харьковском тракторном заводе хорошие результаты по обработке деталей топливной аппаратуры (из стали ШХ15) получены от применения пасты, состоящей из 49% электрокорунда, 16% окиси хрома, 20% олеиновой кислоты, 7% стеарина, 7% парафина и 1% керосина.

Для тонкой доводки и полирования металлов, стекла и минералов применяют пасты ЛИК. Они состоят из электрокорунда (50—55%), парафина (стеарина), минерального масла (37—40%), олеиновой кислоты (5—7%) и керосина (3%).

§ 2. АЛМАЗНЫЕ ПАСТЫ

Алмазные пасты применяют на доводочных, притирочных и полировочных операциях. При использовании алмазных паст взамен абразивных паст и порошков в 2—3 раза увеличивается производительность труда, на 2—3 класса понижается шероховатость поверхности (12—14-й класс) и в 2 раза увеличивается стойкость деталей.

Пасты состоят из порошков синтетических или природных алмазов, связующих и поверхностно-активных веществ. Для их изготовления применяют алмазные микропорошки АСМ и АМ зернистостью 60/40, 40/28, 28/20, 20/14, 14/10, 10/7, 7/5, 5/3, 3/2, 2/1, 1/0. По специальным заказам изготовляют пасты зернистостью 50/40 и 63/50. Обозначение зернистости пасты соответствует обозначению алмазного порошка, из которого она изготовлена.

Пасты выпускаются нормальной (Н) и повышенной (П) концентрации с соответствующим содержанием алмазного порошка для каждой зернистости.

В зависимости от зернистости пасты условно подразделяют на четыре группы, которые окрашивают в различные цвета: красный, голубой, зеленый, желтый. В эти же цвета должны окрашиваться этикетка, наклеенная на емкость с пастой, или сама емкость (табл. 15).

Таблица 15

Содержание алмазного порошка в пасте, цвет пасты и этикетки

<table>
<tr><th rowspan="2">Зернистость пасты</th><th colspan="2">Концентрация алмазного порошка в % по массе</th><th rowspan="2">Цвет пасты и этикетки</th><th rowspan="2">Зернистость пасты</th><th colspan="2">Концентрация алмазного порошка в % по массе</th><th rowspan="2">Цвет пасты и этикетки</th></tr>
<tr><th>Н</th><th>П</th><th>Н</th><th>П</th></tr>
<tr><td>60/40</td><td>10</td><td>20</td><td rowspan="2">Красный</td><td>10/7</td><td rowspan="2">3</td><td rowspan="2">6</td><td rowspan="3">Зеленый</td></tr>
<tr><td>40/28</td><td rowspan="2">7</td><td rowspan="2">14</td><td>7/5</td></tr>
<tr><td>28/20</td><td rowspan="3">Голубой</td><td>5/3</td><td rowspan="2">2</td><td rowspan="2">4</td></tr>
<tr><td>20/14</td><td rowspan="2">5</td><td rowspan="2">10</td><td>3/2</td><td rowspan="3">Желтый</td></tr>
<tr><td>14/10</td><td>2/1</td><td rowspan="2">1</td><td rowspan="2">2</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td>1/0</td></tr>
</table>

Содержание алмазного порошка зависит от зернистости и концентрации пасты. По специальным заказам изготовляют пасты и с бо́льшим содержанием алмазного порошка, но, как правило, не больше 50%. Порошок в пасте должен быть равномерно распределен по всему объему.

Выпускаются алмазные пасты, смываемые водой (В) и органическими растворителями (О) (керосин, бензин, масло, спирт и т. д.), а также смываемые как водой, так и органическими растворителями

(ВО). По консистенции пасты подразделяют на мазеобразные (М) и твердые (Т). К специальной группе следует отнести жидкие пасты в аэрозольной упаковке. Состав связующих и поверхностно-активных веществ не регламентируется. Пасты не должны иметь резкого неприятного запаха и не должны быть токсичными. В них не должно быть посторонних примесей крупнее зерен алмазного порошка.

Пример условного обозначения пасты из порошков природного алмаза марки АМ зернистостью 40/28, нормальной концентрации, смываемой водой, мазеобразной консистенции: паста алмазная АМ 40/28 НВМ ГОСТ 16877—71.

При изготовлении паст зернистостью 3/2 и менее рекомендуется применять ультразвуковую обработку при температуре 50° С смеси алмазного порошка с компонентами основы пасты.

В качестве наполнителей паст используют абразивные порошки из карбида бора, зеленого карбида кремния и электрокорунда. В связи с тем, что абразивные порошки имеют менее жесткий зерновой состав по сравнению с алмазными порошками, их зернистость должна быть на один-два номера ниже зернистости пасты, в которую они входят в качестве наполнителя. Пасты с наполнителем выпускаются в основном крупнозернистые — 20/14 и крупнее. Выпускаемые Ленинградским абразивным заводом «Ильич» мазеобразные пасты типа О, хорошо разбавляются маслом или керосином. Основа пасты состоит из следующих веществ: кубовый остаток концентрата синтетических жирных кислот, осидол-мылонафт, олеиновая кислота, вазелиновое масло.

Консистенция алмазных паст по методике, указанной в ГОСТ 16877—71, определяется при помощи пенетрометра марки ЛП-1 с облегченной конусной иглой. Контроль эксплуатационных показателей качества паст (абразивная способность и шероховатость обработанных поверхностей) производится на станке УАС-2М по методикам, практически не отличающимся от контроля микропорошков. Абразивная способность паст выражается в миллиграммах сошлифованного твердого сплава и должна соответствовать гарантированным нормам, приведенным в табл. 16.

Таблица 16

Нормы абразивной способности алмазных паст различных зернистостей

Консистенция пасты	Абразивная способность (в мг) при зернистости							
	60/40	40/28	28/20	20/14	14/10	10/7	7/5	5/3
Н	38	35	32	26	21	16	10	4
П	65	60	54	46	39	33	22	6

Примечание. Пасты зернистостью 3/2, 2/1 и 1/0 испытанию на абразивную способность не подвергаются.

Нормы шероховатости поверхности образцов из твердого сплава ВК6 после обработки пастой при установленном режиме испытания те же, что и для микропорошков.

Расфасовку алмазных паст производят в соответствующую по емкости тару (тубы или шприцы) по 5, 10, 20, 40, 80 г, которые упаковывают в картонные или пластмассовые коробки с перегородками, рассчитанными на 1, 2, 4, 6, и 10 емкостей пасты с одинаковой зернистостью. Твердые пасты расфасовывают в пластмассовые или металлические футляры с передвижным дном. На каждой упаковочной коробке должна быть этикетка, на которой указывается товарный знак предприятия-изготовителя и условное обозначение пасты.

§ 3. ПАСТЫ ИЗ КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА

Пасты из кубического нитрида бора (кубонита и эльбора) применяются для доводки деталей, которые должны быть изготовлены с высокой точностью и низкой шероховатостью поверхности. Наиболее эффективны они при доводке деталей из незакаленных сталей, чугуна, цветных металлов и т. п.

Пасты изготовляют из порошка кубического нитрида бора в смеси со связующими и поверхностно-активными веществами. В качестве основы используются составы, смываемые водой или органическими растворителями. Водорастворимые пасты рекомендуются в тех случаях, когда детали нельзя промывать огнеопасными жидкостями. Пасты, смываемые органическими растворителями (керосином, бензином и др.) рекомендуются для обработки деталей из различных металлов. В случае необходимости их можно разбавлять несколькими каплями индустриального масла, керосина или их смесью. Технология изготовления паст из кубического нитрида бора не отличается от технологии изготовления алмазных паст.

Пасты из кубонита по консистенции бывают мазеобразные М и твердые Т. Мазеобразные пасты поставляются потребителем расфасованными в тубы или шприцы. Пасты изготовляют нормальной Н, повышенной П и высокой В концентрации. При выборе паст следует учитывать, что концентрация (содержание кубонита в процентах по массе) зависит от зернистости порошка и твердости материала обрабатываемой детали. Чем крупнее порошок и тверже материал, тем выше должна быть концентрация кубонита. В табл. 17 приводятся некоторые характеристики паст из кубонита.

Пасты из эльбора изготовляют из порошков зернистостью ЛМ 40—ЛМ 1, с концентрацией высокой В, средней С, низкой Н и повышенной П. По консистенции различают твердые Т, густые Г, мазеобразные М и жидкие Ж пасты.

Основные правила применения паст из кубонита и эльбора не отличаются от принятых при эксплуатации алмазных паст. Шероховатость поверхности, обработанной пастами, находится в пределах 8—14-го класса и зависит от зернистости пасты, материала притира, твердости материала, обрабатываемой детали и т. п. В качестве примера в табл. 18 приводятся рекомендации по применению паст из эльбора.

Таблица 17

Характеристика паст из кубонита

Зернистость	Размер зерен порошка основной фракции в мкм	Концентрация порошка в %			Цвет пасты и этикетки
		Н	П	В	
60/40 40/28	60—40 40—28	8	20	40	Красный
28/20 20/14 14/10	28—20 20—14 14—10	6	15	30	Зеленый
10/7 7/5 5/3	10—7 7—5 5—3	4	10	20	Голубой
3/2 2/1 1/0	3—2 2—1 До 1	2	5	10	Желтый

Таблица 18

Основные рекомендации по выбору паст из эльбора

Зернистость	Операция	Снимаемый припуск в мм	Рекомендуемый материал притира	Класс шероховатости поверхности
ЛМ40 ЛМ28 ЛМ20	Предварительная	0,05—0,02	Чугун, сталь	8—9
ЛМ14 ЛМ10 ЛМ7	Чистовая	0,02—0,01	Чугун, текстолит, самшит, цветные металлы	10—11
ЛМ5 ЛМ3 ЛМ1	Окончательная	0,002—0,003	Липа, самшит, чугун, кварц, береза, войлок, фетр, велюр, замша, батист	11—13

§ 4. ПРИМЕНЕНИЕ ПАСТ

Алмазные пасты применяются для доводки деталей 1-го и 2-го класса точности и с шероховатостью поверхности 10—14-го класса. Для обеспечения высокого качества обработанной поверхности, снижения расхода алмазов и сокращения времени на доводку (притирку) алмазные пасты следует применять только после тщательной предварительной обработки и очистки детали. Чем тверже и более хрупок материал обрабатываемой детали, тем выше, как правило, достига-

смый класс шероховатости поверхности. Так, для достижения шероховатости поверхности 14-го класса при обработке природного алмаза необходим алмазный порошок зернистостью 10/7, для твердого сплава 5/3 и для закаленной стали 1/0. Твердость притиров также влияет на шероховатость поверхности, поэтому выбрать зернистость пасты для получения необходимой шероховатости поверхности без учета материала обрабатываемой детали и его твердости, твердости притира и других факторов можно только ориентировочно (табл. 19). Субмикропорошки 0,7/0, 0,5/0, 0,3/0, 0,1/0 и пасты из

Таблица 19

Выбор зернистости пасты

Класс шероховатости	Шероховатость поверхности в мкм		Зернистость алмазного порошка (пасты)
	Среднее арифметическое отклонение профиля R_a, не более	Высота неровностей профиля R_z в мкм, не более	
8—9	0,63—0,16	—	60/40—40/28
9—10	0,32—0,08	—	40/28—28/14
10—11	0,16—0,04	—	28/14—14/10
11—12	0,08—0,020	—	14/10—10/7
12—13	0,04—0,020	0,1—0,05	10/7—5/3
13—14	—	0,1—0,025	5/3—1/0

них по экономическим соображениям рекомендуется применять только в тех случаях, когда использование самого мелкого микропорошка 1/0 не обеспечивает требуемого качества обработанной поверхности.

В качестве материала для притира применяют чугун (сталь), латунь, медь, фибру, древесину, кожу, войлок, фетр. Выбор притира зависит от материала обрабатываемой детали, его твердости и требуемой шероховатости поверхности. Для осуществления процесса доводки необходимо, чтобы притир шаржировался, т. е. чтобы абразивные зерна вдавливались в его поверхность.

Доводка выполняется алмазными пастами двух-трех зернистостей с постепенным переходом от более крупной к мелкой. Число последовательно применяемых паст зависит от припуска и требуемой шероховатости обрабатываемой поверхности. При небольших припусках и малых рисках доводка производится пастой одной зернистости, которая определяется требуемой шероховатостью поверхности при условии достижения максимальной производительности обработки.

В одном карате алмазного порошка в зависимости от его зернистости содержится от десятка миллионов до ста и более миллиардов алмазных частиц, и каждое алмазное зерно выполняет работу по доводке. Поэтому алмазные пасты необходимо наносить на притир в очень малом количестве во избежание большого накопления зерен, которое не способствует увеличению производительности обработки,

а только влечет за собой неоправданный расход пасты и удорожание операции. Для точной дозировки пасты, в случае получения ее в тубах, целесообразно снабдить рабочих специальными прозрачными градуированными шприцами для каждой зернистости в отдельности, в которые можно было бы перед началом работы выдавить пасту. Применение шприцев для дозировки пасты позволит значительно сократить расход алмаза.

При пользовании пастой необходимо для пасты каждой зернистости применять отдельный притир. При переходе от пасты крупной зернистости к мелкой обрабатываемую деталь нужно тщательно промывать. Пасту следует хранить при температуре не выше 25° С. При более высокой температуре вязкость ее уменьшается и алмазный порошок осаждается.

Алмазные пасты можно применять как при ручной, так и при машинной доводке. Наибольшая производительность процесса достигается, естественно, при механизации процесса. При машинной доводке относительная скорость перемещения детали и шлифовальника рекомендуется в пределах 50—80 м/мин при давлении 1,5—3 кгс/см^2.

Глава IV. АБРАЗИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ

Абразивными называют инструменты, у которых в качестве режущих элементов используются абразивные зерна, прочно соединенные связкой. Чтобы обеспечить обработку поверхности детали, абразивные зерна должны быть прочными и более твердыми, чем обрабатываемый материал, иметь достаточно острые кромки и твердую опору, обеспечивающую достаточную силу прижима и внедрение зерен в обрабатываемую поверхность. Абразивную обработку разделяют на два основных вида — шлифование и полирование, а абразивный инструмент, соответственно, на шлифовальный и полировальный. Шлифовальный инструмент обеспечивает получение точных размеров, правильной формы и микрогеометрии поверхности. Полировальный инструмент применяют, как правило, только для обеспечения высокого класса шероховатости обработанной поверхности.

§ 1. ВЫБОР И ПРОЕКТИРОВАНИЕ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

Промышленность нашей страны в соответствии с существующими ГОСТами выпускает десятки тысяч типоразмеров абразивных инструментов, отличающихся как по форме и размерам, так и по характеристикам. Поэтому в процессе создания технологических процессов абразивной обработки деталей проектирование абразивного инструмента практически сводится к выбору его типовых форм и размеров, а также определению оптимальных характеристик в соответствии с условиями эксплуатации. Стандартные шкурки и ленты, бруски и сегменты, выпускаемые промышленностью, обеспечивают также широкие возможности для проектирования специальных сборных шлифовальных кругов, хонинговальных и шлифовальных головок и т. д.

Характеристики абразивного инструмента

К основным характеристикам абразивного инструмента относятся:

а) марка абразивного материала и зернистость порошка, из которого изготовлен инструмент;

б) материал связки, удерживающей зерна в процессе обработки деталей;

в) твердость круга, характеризующая прочность удержания абразивных зерен в связке;

г) структура, определяющая объем, занимаемый абразивным порошком.

Для эффективной работы абразивного инструмента необходимо обеспечить также его высокую прочность, уравновешенность, точность формы и размеров. Характеристики и показатели качества инструмента регламентируются требованиями ГОСТов, нормалей и технических условий.

Связка соединяет в абразивном инструменте отдельные зерна абразивного порошка между собой. В промышленности широко применяют керамические, бакелитовые и вулканитовые связки.

Керамическая связка (К), в состав которой входят огнеупорная глина, полевой шпат, борные стекла, кварц, мел, тальк и другие компоненты, из-за водостойкости, химической стойкости, жесткости и сравнительно высокой прочности на разрыв широко распространена и применяется для изготовления всех типоразмеров абразивного инструмента. Инструменты на керамической связке обеспечивают достаточно высокую производительность, хорошо сохраняют профиль, имеют высокую пористость и хорошо отводят тепло. Недостатком керамической связки является хрупкость, которая делает абразивные инструменты чувствительными к ударной нагрузке. Шлифовальные круги на керамических связках различного состава обычно используются при окружной скорости шлифования до 35 м/с, круги, изготовленные по особой технологии, — для скоростного шлифования при 50 м/с, мелкозернистые круги могут работать при скорости до 65 м/с.

Бакелитовая связка (Б) на основе фенолформальдегидных смол обладает высокой удельной прочностью и упругостью и широко применяется для изготовления тонких кругов, а также кругов, работающих с переменной нагрузкой. Инструмент на бакелитовой связке обладает высокой самозатачиваемостью рабочей поверхности и обеспечивает меньший нагрев обрабатываемой детали по сравнению с инструментом на керамической связке, а поэтому применяется при большой площади соприкосновения круга с обрабатываемой поверхностью, например при плоском шлифовании торцом круга. Бакелитовая связка оказывает полирующее действие, что повышает качество обработки. К недостаткам бакелитовой связки можно отнести невысокую стойкость к щелочным охлаждающим жидкостям, низкую теплостойкость и проявление «ползучести» (увеличение объема под действием постоянной нагрузки). Применяют органические связки с использованием различных наполнителей, обеспечивающих высокое качество абразивного инструмента и обработанной поверхности. Армированные круги на бакелитовой связке обеспечивают шлифование на повышенных скоростях: 50—65 м/с.

Вулканитовая связка (В) состоит в основном из синтетического каучука с различными добавками, влияющими на твердость, прочность и эластичность инструмента. На вулканитовой связке изготовляют жесткие и гибкие абразивные инструменты. Жесткие круги на вулканитовой связке обладают большей прочностью

и упругостью по сравнению с бакелитовыми и поэтому применяются для изготовления тонких кругов, используемых при высоких окружных скоростях шлифования (до 50 м/с). Гибкие круги могут деформироваться в процессе обработки; применяются они для чистовых операций с окружной скоростью шлифования до 18 м/с. Вулканитовые круги обладают бо́льшим полирующим действием, чем бакелитовые круги, и обеспечивают высокий класс шероховатости обработки, так как абразивные зерна могут углубляться под действием сил резания в упругий материал связки. К недостаткам кругов на вулканитовой связке следует отнести низкую теплостойкость и высокую плотность, приводящую к повышению температуры в зоне обработки, размягчению связки, заволакиванию пор между зернами и засаливанию круга. Инструмент на вулканитовой связке может быть четырех степеней эластичности: эластичный 1ГК, среднеэластичный 2ГК, малоэластичный 3ГК, жесткий 4ГК.

Магнезиальная связка состоит из каустического магнезита и раствора хлористого магния, образующих при смешивании магнезиальный цемент, твердеющий на воздухе. Инструмент на магнезиальной связке имеет повышенную твердость, гигроскопичен, вследствие чего должен храниться в сухом проветриваемом помещении, обладает невысокой прочностью, допускающей рабочую окружную скорость до 20 м/с. Но он быстро изнашивается и имеет нестойкий профиль, а поэтому применяется редко.

Силикатовая связка приготовляется из жидкого стекла, которое смешивается с различными наполнителями (окисью цинка, мелом, глиной и др.). Силикатовая связка обладает достаточной прочностью, однако плохо смачивает абразивные зерна и слабо соединяется с их поверхностью. По этой причине круги на силикатовой связке имеют повышенный износ, хорошую самозатачиваемость и применяются в тех случаях, когда необходимо вести обработку при невысокой температуре в зоне резания.

Твердость абразивного инструмента — сопротивляемость связки вырыванию абразивных зерен с поверхности инструмента под влиянием внешних сил. Степень твердости круга определяет его поведение в работе. Термин «твердость» в данном случае не имеет отношения к характеристике свойств абразивного материала, из которого изготовлен инструмент. Твердость абразивного инструмента является комплексным показателем и изменяется только в зависимости от соотношения количества зерен, связки и пор в конкретном инструменте. В соответствии со стандартом твердость кругов в СССР характеризуется буквенным обозначением:

Твердость инструмента	Подразделения
Мягкий — М	М1, М2, М3
Среднемягкий СМ	СМ1, СМ2
Средний С	С1, С2
Среднетвердый СТ	СТ1, СТ2, СТ3
Твердый Т	Т1, Т2
Весьма твердый ВТ	ВТ1, ВТ2
Чрезвычайно твердый ЧТ	ЧТ1, ЧТ2

В подразделениях твердости цифры 1, 2, 3 справа от буквенного обозначения характеризуют твердость абразивного инструмента в порядке ее возрастания. Пределы твердости абразивного инструмента зависят от марки связки, на которой он изготовляется. Абразивный инструмент на керамической или бакелитовой связках выпускается в интервале М1—ЧТ2, а инструмент на вулканитовой связке СМ1—Т2.

До настоящего времени отсутствует единый метод определения твердости абразивных инструментов различных характеристик. Так, ГОСТ 3751—47 предусмотрены три метода контроля твердости. Твердость шлифовальных брусков всех форм и размеров, шлифовальных кругов высотой не более 8 мм, зернистостью до 12, на керамической и бакелитовой связках измеряется по ГОСТ 19202—73 на приборе Роквелла с применением шариков диаметром 5 или 10 мм. Для измерения твердости сначала прикладывают предварительную нагрузку 10 кгс, а затем основную. Инструменты зернистостью 12—8 и предполагаемой твердостью М1—М3 испытываются с основной нагрузкой 150 кгс и шариком диаметром 10 мм, прочий инструмент — с нагрузкой 100 кгс и шариком диаметром 5 мм. Результаты измерений отсчитывают по шкале В индикатора.

Твердость абразивных инструментов (кроме брусков зернистостью до 12, а также шлифовальных кругов высотой менее 8 мм и зернистостью до 12) из электрокорунда и карбида кремния на керамической, бакелитовой и глифталевых связках зернистостью до 50 измеряют по ГОСТ 18118—72 на приборе, действие которого основано на разрушении поверхности инструмента струей кварцевого песка заданного объема. Твердость оценивают по глубине получаемой лунки.

В последнее время для определения кругов на керамической связке создан прибор «Звук 1», принцип действия которого основан на использовании акустического метода контроля твердости по частоте собственных колебаний абразивного инструмента. Генератор создает электрические синусоидальные колебания, частота которых может меняться в пределах 5—550 кГц. Электрические колебания с помощью пьезоэлектрического излучателя преобразуются в механические, передаются контролируемому образцу и воспринимаются пьезоэлектрическим приемником, осуществляющим обратное преобразование. Электрические колебания с приемника усиливаются усилителем и поступают на индикаторы резонанса. При совпадении частоты колебаний, создаваемых генератором, с частотой собственных колебаний образца наступает резонанс, который фиксируется индикаторами. В зависимости от частоты колебаний резонансного состояния по градуировочным таблицам для конкретных типоразмеров кругов определяют их твердость.

Твердость инструмента на эластичной вулканитовой связке характеризуют числом оборотов, которое необходимо для образования лунки определенной глубины плоским сверлом при постоянном осевом давлении. Сравнивая полученные показатели с данными, приведенными в таблицах стандарта, определяют степень твердости

инструмента. Независимо от метода измерения шлифовальные круги и сегменты испытывают в четырех точках, расположенных в различных местах инструмента, а бруски — в трех точках. Твердость определяется по средним арифметическим значениям глубин лунок или чисел оборотов.

Структура. Под структурой абразивного инструмента понимают его строение, т. е. отношение объемов порошка абразивного материала, связки и пор.

Структура абразивного инструмента определяется номером, значение которого зависит от объемного содержания зерна. Самая плотная структура с содержанием абразивного зерна 60% имеет номер 1. С увеличением номера структуры на единицу объем зерна уменьшается на 2%. Структуры 1—4 называют закрытыми, 5—8 — средними и 9—12 — открытыми. При постоянном объеме порошка соотношение количества связки и пор определяет твердость инструмента.

Установлено, например, что изменение объема, занимаемого керамической связкой, на 1,5% и, соответственно, объема пор приводит к изменению твердости на одну степень. При изменении номера структуры на одну степень для сохранения заданной твердости инструмента объем абразивного зерна уменьшают (увеличивают) на 2% и на столько же увеличивают (уменьшают) объем связки.

В настоящее время освоены методы получения высокопористых абразивных инструментов. Они изготовляются из сравнительно мелких абразивных зерен, а их свойства близки к свойствам крупнозернистого инструмента. Меньшая объемная масса и хорошая обдуваемость воздушными потоками высокопористых кругов позволяют успешно использовать их на повышенных скоростях при выполнении обдирочных и получистовых операций.

Прочность. Абразивный инструмент, воспринимающий в процессе работы различные по характеру и величине нагрузки, должен обладать достаточной прочностью. Сопротивляемость инструмента нагрузкам зависит от таких его характеристик, как марка связки, зернистость абразивного порошка, твердость, структура. Как показали исследования, вид абразивного инструмента существенного влияния на прочность не оказывает. Наибольшей прочностью обладают инструменты, изготовленные на вулканитовой связке. Они не разрушаются при значительных упругих деформациях и поэтому применяются для изготовления тонкостенного и работающего при ударных нагрузках инструмента. Инструмент на керамической связке — хрупкий (до момента разрушения не имеет пластических деформаций), а поэтому не выдерживает ударных нагрузок. Модуль упругости его на растяжение и сжатие составляет примерно $(6—1)\cdot 10^6$ кгс/см^2, а относительное удлинение к моменту разрушения 0,02—0,03. Инструмент на бакелитовой связке по прочности занимает промежуточное положение. Общим для инструмента на всех связках является то, что временное сопротивление при всех видах деформации с повышением твердости и с уменьшением зернистости повышается.

В результате исследования сил, действующих на инструмент в процессе работы, было установлено, что основную опасность представляют центробежные силы. Именно они при существующих рабочих скоростях вращения круга вызывают в нем напряжения, близкие по величине к временному сопротивлению материала круга. Силы резания, возникающие в процессе шлифования, создают напряжения на сжатие порядка 20—30 кгс/см², которые ничтожно малы по сравнению с временным сопротивлением на сжатие инструмента и поэтому практической опасности не представляют. В связи с вышеуказанным основным методом испытания кругов является вращение их со скоростью, превышающей рабочую. Режимы испытания кругов на прочность, правила и нормы безопасной работы абразивного инструмента определены ГОСТ 3881—65.

Испытаниям подвергают все круги диаметром 150 мм и более, а также круги диаметром 30 мм и более, предназначенные для работы со скоростью свыше 40 м/с. Испытательная скорость вращения должна на 50% превышать рабочую окружную скорость, а время испытания должно быть 3—7 мин в зависимости от диаметра круга и рабочей скорости вращения. Не производится испытание механической прочности шлифовальных кругов формы ПП размером 600×$\times$100$\times$290 и 800$\times$100$\times$290; кругов форм ПП и ПВД на вулканитовой и бакелитовой связке, которые используются в качестве ведущих при бесцентровом шлифовании, а также кругов формы ПН, ПР, М, К, сегментов, брусков и головок всех размеров.

Уравновешенность кругов влияет на шероховатость обрабатываемой поверхности и эффективность применения инструмента. В процессе работы в каждом элементарном объеме круга возникает центробежная сила инерции, направленная от оси вращения по радиусу из центра массы этого объема. Центробежная сила инерции

$$P_и = m\omega^2 r,$$

где m — масса рассматриваемого объема тела;
ω — угловая скорость вращения тела;
r — расстояние от центра массы рассматриваемого объема до оси вращения.

Если предположить, что абразивный круг абсолютно однороден во всех своих точках, т. е. любые элементарные объемы имеют одинаковую плотность, то в случае абсолютной симметричности круга силы инерции элементарных масс будут взаимоуравновешены. В этом случае центр массы круга должен находиться на геометрической оси, которая совпадает с осью вращения. В действительности же круги имеют радиальное и торцовое биение рабочих и нерабочих поверхностей относительно посадочного отверстия и другие отклонения формы, которые находятся в поле допуска. Однако и при абсолютной симметричности рабочих и нерабочих поверхностей относительно посадочного отверстия очень трудно обеспечить соосное расположение круга со шпинделем станка. Все это является причиной неравномерности расположения объема абразивного инструмента относительно оси вращения и, как следствие, возникновения не-

уравновешенной силы при работе. Одной из причин неуравновешенности является также то, что технологический процесс не обеспечивает изготовление кругов с равномерной плотностью по всему объему.

Инерционные центробежные силы неуравновешенных вращающихся масс в процессе работы кругов создают дополнительную переменную нагрузку на опоры и являются источником вибрации, ухудшающей качество обработки. Поэтому при изготовлении и эксплуатации абразивные круги нужно обязательно уравновешивать. Неуравновешенность может быть статической и динамической. На практике наиболее распространен случай, когда деталь неуравновешена как в статическом, так и в динамическом режиме.

Вследствие того, что абразивные круги имеют сравнительно небольшую ширину, плечо пары сил, обусловливающих динамическую неуравновешенность, невелико и неуравновешенный крутящий момент вокруг оси, перпендикулярной к оси вращения круга, тоже невелик. Поэтому абразивные круги достаточно подвергать статической балансировке, т. е. балансировать только в одной плоскости. Статической балансировке подвергаются все абразивные круги, за исключением кругов диаметром до 250 мм и высотой до 6 мм, а также инструментов формы Д, К, ЧК, ЧЦ, ПН, ПР, М. Классы, допускаемые величины и метод измерения статического дисбаланса шлифовальных кругов предусмотрены ГОСТ 3060—55.

Статический дисбаланс шлифовального круга характеризует его неуравновешенность, вызванную несовпадением центра массы круга с осью вращения. За единицу дисбаланса принята величина груза E, закрепленного на периферии, устраняющая неуравновешенность, вызванную смещением центра массы от геометрического центра круга (при объемной массе круга 2,4 г/см^3) на 0,01 см:

$$E = \frac{0{,}0377\,(D^2 - d^2)\,H}{D},$$

где d — диаметр отверстия шлифовального круга в см;

D — наружный диаметр шлифовального круга в см;

H — высота шлифовального круга в см.

В зависимости от дисбаланса и высоты круга устанавливаются четыре класса дисбаланса. Класс дисбаланса выбирается в зависимости от высоты, зернистости и связки шлифовального круга.

Статическую балансировку выполняют при изготовлении кругов и перед установкой на станке. Процесс состоит из двух этапов. Вначале измеряют статический дисбаланс круга. Для этого шлифовальный круг устанавливают на стальную балансировочную оправку (рис. 22) твердостью не ниже *HRC* 50. Предварительно, если диаметр посадочного отверстия больше 127 мм, на оправку насаживают крестовину (рис. 23) или конусную втулку, на которых центрируют круг. Балансировочная оправка совместно с конусной втулкой или четырехопорной крестовиной должна быть предварительно отбалансирована. Шероховатость поверхности балансировочной оправки, кон-

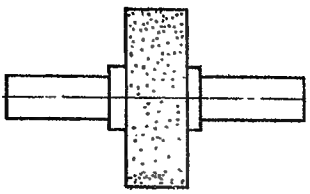


Рис. 22. Установка круга на балансировочн оправке

тактирующей с валиками балансирово ного станка, должна быть не ни 8-го класса.

Круг вместе с оправкой устанавливаю на балансировочный станок (рис. 24), о новной частью которого являются два г ризонтально установленных по уровню стержня одинакового диаметр Горизонтальные стержни должны иметь твердость не ниже *HRC* и шероховатость поверхности не ниже 9-го класса. Балансировочн оправка располагается перпендикулярно горизонтальным стержн станка, а круг — симметрично (между ними). Легким толчком кру придают медленное вращение. Естественно, что тяжелая часть кру стремится занять крайнее нижнее положение. После остановки кру отмечают верхнюю точку его периферии и к ней крепят зажим, с помощью его груз определенной величины. Затем операцию повт ряют. Груз подбирают до тех пор, пока круг не будет находитьс в безразличном равновесии, т. е. после толчка он будет останавл ваться в произвольных положениях. Суммарная масса груза с з жимом и будет представлять статический дисбаланс круга.

При балансировке на абразивных заводах круги уравновешиваю как правило, заливкой в специальное отверстие с легкой стороны круга металла (свинца).

Размеры гнезда под заливку свинца рассчитывают исходя из фа тической величины неуравновешенности. Необходимо учитывать, что глубина вырубки не должна быть больше $^1/_3$ высоты круг а отверстие под заливку не должно попадать под поверхность приле гания к кругу зажимных фланцев.

Те круги, у которых величина смещения центра масс выходи за пределы допуска, но не превышает некоторой величины, называе мой браковочной неуравновешенностью, подлежат уравновешива

Рис. 23. Четырехопорная крестовина

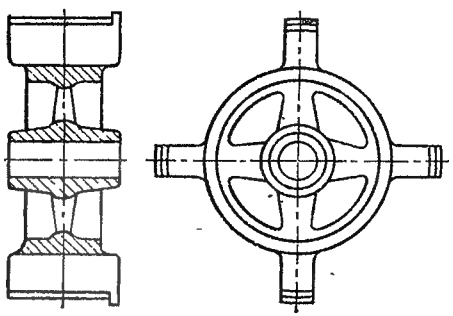
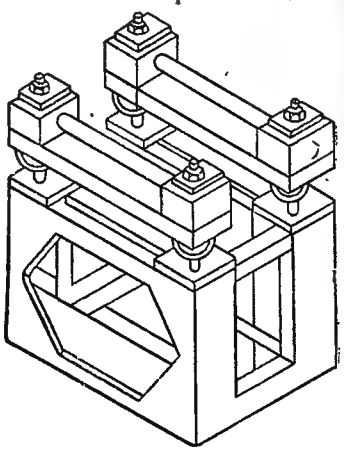


Рис. 24. Балансировочный станок



шию. Величина браковочной неуравновешенности определена исходя из максимально допустимых размеров гнезда под заливку свинца и требований к однородности круга. Если же величина смещения центра масс превышает браковочную неуравновешенность, то круг бракуется.

Так как неуравновешенность круга зависит от точности его установки на фланцы и шпиндель станка и после переустановки может изменяться, то в дополнение к балансировке, производимой на абразивных заводах, круги балансируют непосредственно на шлифовальных станках. С этой целью на станках предусмотрены специальные фланцы с переставными грузами и балансировочные механизмы.

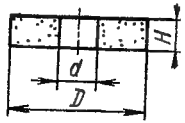
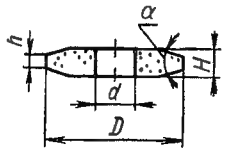
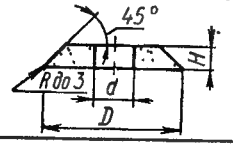
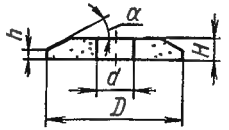
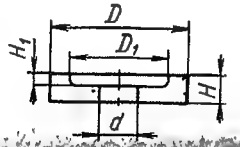
Форма и размеры инструментов

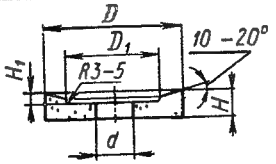
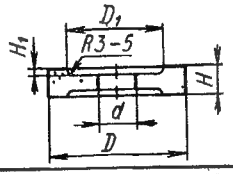
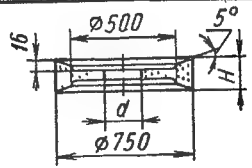
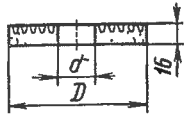
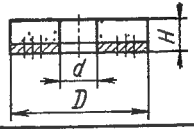
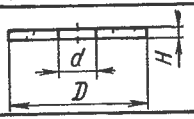
Форма и размеры абразивного инструмента, как правило, регламентированы ГОСТами, отраслевыми стандартами и стандартами предприятий. Специальный инструмент изготовляют только по особым заказам. В зависимости от формы сечения и рода выполняемых работ различают несколько видов абразивного инструмента: шлифовальные круги (ГОСТ 2424—67, табл. 20), головки (ГОСТ 2447—64, табл. 21), бруски (ГОСТ 2456—67, табл. 22), сегменты (ГОСТ 2464—67, табл. 23), абразивный инструмент для правки абразивных кругов (ГОСТ 6565—67), шлифовальные фибровые диски (ГОСТ 8692—58), абразивные ленты (ГОСТ 12439—66), шлифовальные водостойкие шкурки на тканевой основе (ГОСТ 13344—67), водостойкие шкурки на бумажной основе (ГОСТ 10054—62), шлифовальные шкурки на бумажной основе (ГОСТ 6456—68).

Круги представляют собой тела вращения, у которых имеется центральное отверстие для установки на оправку или шпиндель станка. Абразивные головки в отличие от кругов имеют небольшой диаметр и глубокое центральное отверстие, в которое посредством клеящего вещества крепится оправка, имеющая в месте соединения с головкой накатку или специальные канавки, а для крепления в патроне шпинделя — цилиндрический хвостовик. Абразивные инструменты прямолинейной формы, предназначенные для ручной или машинной работы, называют брусками. В процессе обработки они, как правило, работают своей продольной поверхностью. Шлифовальные сегменты предназначены для оснащения различных сборных конструкций абразивных кругов с прерывистой рабочей поверхностью. Для шлифования и доводки широко применяются абразивные шкурки, ленты и диски. Они, как правило, используются в качестве абразивосодержащего слоя различных конструкций абразивного инструмента. Однако существуют методы обработки, когда абразивная лента выполняет функции собственно инструмента. При этом детали шлифуют либо при свободном натяжении ленты, либо когда лента дополнительно прижата к обработанной поверхности специальным копиром или роликовой опорой. Шлифовальные ленты бывают с тонким (1—2 мм) слоем абразивного зерна и толстым 3—8 мм). Более широкое применение из-за высокой производительности

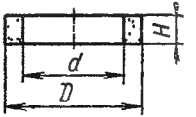
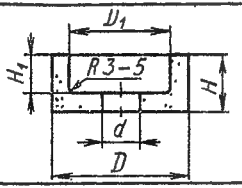
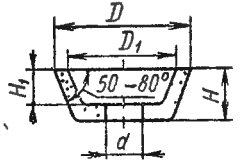
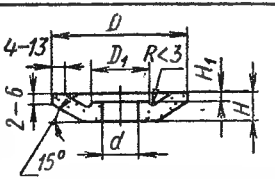
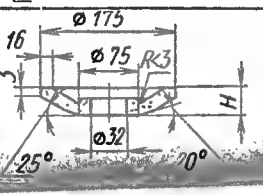
Таблица 20

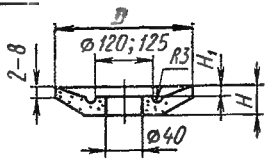
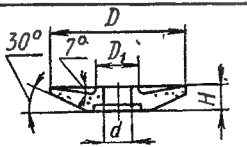
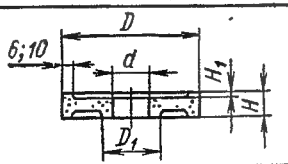
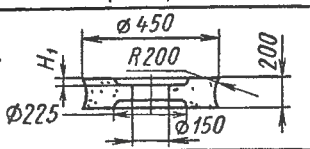
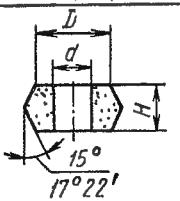
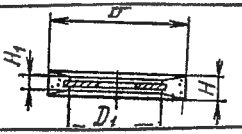
Форма, основные размеры и назначение шлифовальных кругов (ГОСТ 2424—67)

Наименование	Форма	Обозначение	Размеры в мм	Назначение
Плоские прямого профиля		ПП	$D = 3 \div 1400$ $H = 6 \div 250$ $d = 1 \div 305$	Круглое внутреннее шлифование ($D <$ < 150мм); круглое наружное шлифование в центрах ($D = 250 \div 1100$); плоское шлифование периферией круга ($D = 175 \div$ $\div 450$ мм); бесцентровое шлифование ($H \geqslant$ $\geqslant 75$ мм); заточка; шлифование шлицев; шлифование деталей подшипников качения
Плоские с двустороннim коническим профилем		2П	$D = 250 \div 500$ $H = 10 \div 36$ $d = 75 \div 254$ $h = 2 \div 8$ $\alpha = 40,\ 60°$	Шлифование резьбы к зубьев колес
Плоские 45°-го конического профиля		3П	$D = 250;\ 300$ $H = 6 \div 13$ $d = 75,\ 127$	Заточка пнл
Плоские с малым углом коинческого профиля		4П	$D = 80 \div 500$ $H = 6 \div 40$ $d = 20 \div 203$ $h = 2 \div 5{,}5$ $\alpha = 10 \div 35°$	Шлкфование долбяков, шеверов, зубьев колес, заточка коицевых червячиых фрез
Плоскне с выточкой		ПВ	$D = 10 \div 600$ $H = 13 \div 100$ $d = 3 \div 305$ $D_1 = 5 \div 375$ $H_1 = 6 \div 30$	Круглое внутреинее шлифование ($D <$ < 150 мм); плоское шлифование периферней круга ($D = 175 \div 450$ мм); круглое наружное шлифование в центрах ($D >$ > 250 мм); заточка инструмента; ручиое обдирочиое шлифование

Плоские с конической выточкой		ПВК	$D = 300 \div 750$ $H = 50,\ 80$ $d = 127 \div 305$ $D_1 = 200 \div 500$ $H_1 = 25,\ 35$	Круглое наружное шлифование с подрезкой торца детали
Плоские с двусторонней выточкой		ПВД	$D = 250 \div 900$ $H = 40 \div 275$ $d = 75 \div 305$ $D_1 = 150 \div 375$ $H_1 = 10 \div 100$	Плоское шлифование периферией круга ($D = 175 \div 450$ мм); круглое наружное шлифование в центрах ($D > 250$ мм); бесцентровое шлифование ($H > 75$ мм)
Плоские с двусторонней конической выточкой		ПВДК	$H = 80\ (75)$ $d = 305$	Круглое наружное шлифование при одновременной подрезке торца
Плоские рифленые		ПР	$D = 500 \div 1340$ $d = 50 \div 250$	Обдирочное шлкфование торцом круга
Плоские наращенкые		ПН	$D = 500 \div 1340$ $H = 40;\ 75$ $d = 20 \div 350$	Шлифование торцом круга
Диски		Д	$D = 80 \div 500$ $H = 0{,}6 \div 4$ $d = 20;\ 32$	Отрезные и подрезные операции; шлифование пазов

Продолжение табл. 20

Наименование	Форма	Обозначение	Размеры в мм	Назначение
Кольца		К	$D = 90 \div 685$ $H = 50 \div 150$ $d = 75 \div 580$	Плоское шлифование торцом круга
Чашки цилиндрическке		ЧЦ	$D = 40 \div 300$ $H = 25 \div 100$ $d = 13 \div 150$ $D_1 = 32 \div 250$ $H_1 = 20 \div 75$	Заточка икструмента; плоское шлифование торцом круга; внутреннее шлифование
Чашки коинческие		ЧК	$D = 50 \div 300$ $H = 25 \div 150$ $d = 13 \div 150$ $D_1 = 40 \div 230$ $H_1 = 16 \div 110$	Заточка инструмента; шлифование направляющих стаинн
Тарелки		1Т	$D = 80 \div 250$ $H = 8 \div 25$ $d = 13 \div 32$ $D_1 = 30 \div 100$ $H_1 = 3 \div 10$	Заточка фрез, метчиков, разверток
		2Т	$H = 16; 20$	Заточка червячных фрез

Тарелки		3Т	$D = 225; 275$ $H = 18; 20$ $H_1 = 2{,}4$	Шлифование зубьев колес
		4Т	$D = 150 \div 350$ $H = 10 \div 40$ $d = 32; 127$ $D_1 = 80 \div 200$	
С двусторонней выточкой и односторонней ступицей		С	$D = 100 \div 300$ $H = 8 \div 40$ $d = 32 \div 127$ $D_1 = 65 \div 180$ $H_1 = 2 \div 16$	Шлифование калибровых скоб
Со сферическим вогнутым профилем		И	$H_1 = 25$	Заточка иголок
Двустороннего углового профиля		КС	$D = 90; 150$ $H = 90; 80$ $d = 20; 32$	Заточка ножей косклок
С металлическим диском		М	$D = 350 \div 750$ $H = 8; 10$ $D_1 = 250 \div 600$ $H_1 = 5 \div 8$	Разрезка минералов

Форма и основные размеры шлифовальных головок (ГОСТ 2447—64)

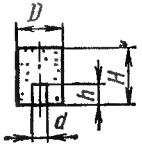
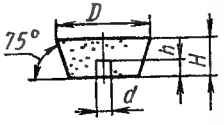
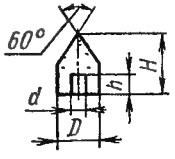
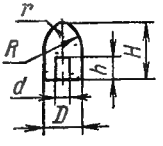
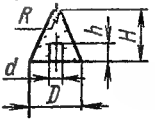
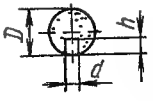
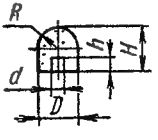
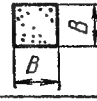
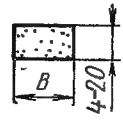
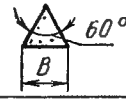
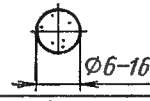
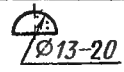
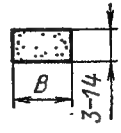
Наименование	Форма	Обозначение
Цилиндрические		ГЦ
Угловые		ГУ
Конические с углом конуса 60°		ГК 60°
Сводчатые		ГСв
Конические с закругленной вершиной		ГКз
Шаровые		ГШ
Шаровые с цилиндрической боковой поверхностью		ГШЦ

Таблица 21

Осиовные размеры в мм					
D	*H*	*d*	*h*	*R*	*r*
3—40	6—60	1—13	3—32	—	—
16—40	8; 10	5; 6	6	—	—
10—32	25—50	3; 6	15; 20	—	—
6—32	10—50	2—6	6—25	12—65	1; 2
8—40	16—60	3—13	6—32	2—5	—
10—32	—	3—6	4—13	—	—
16—25	20—60	5; 6	8—25	7,5—12,5	—

Таблица 22

Форма, основные размеры и назначение шлифовальных брусков (ГОСТ 2456—67)

Наименование	Форма	Обозначение	Основные размеры в мм		Назначение
			B	*L* *	
Квадратные		БКв	4—25	16—20	Ручные слесарные работы; суперфиниширование, хонингование
Плоские		БП	8—40	25—200	
Трехгранные		БТ	6—16	150	Ручные слесарные работы
Круглые		БКр	—	100; 150	
Полукруглые		БПкр	—	150; 200	
Плоские для хонингования (специальные)		БХ	2—15	15—150	Хонингование

* *L* — длина бруска.

и низкой стоимости получили ленты с тонким слоем абразивного зерна, соединенного связкой.

Изготовляются следующие типы абразивных лент (ГОСТ 12439—66): ЛСНТ — склеенная лента (бесконечная), неводостойкая на тканевой основе; ЛСНБ — склеенная лента (бесконечная), неводостойкая на бумажной основе; ЛСВТ — склеенная лента (бесконечная), водостойкая на тканевой основе; ЛНТ — неводостойкая лента на тканевой основе; ЛНБ — неводостойкая лента на бумажной основе; ЛВТ — водостойкая лента на тканевой основе. В качестве абразива для шкурок на бумажной основе применяют стекло, кремень, нормальный и регенерированный электрокорунд, зеленый и черный карбид кремния зернистостью 80—М28. Для шкурок на тканевой основе применяют также кварц, а для ленточного шлифования — белый электрокорунд. В последнем случае могут также применяться

более крупные абразивные зерна (№ 125 и 100). Материал связки (клея) зависит от условий работы. Для изготовления шкурок, работающих всухую, применяется в основном мездровый клей, а для шкурок, работающих с водяным охлаждением, — специальные лаки и смолы. Шкурка поставляется как в рулонах, так и в листах.

Для получения высокого класса шероховатости и точности обрабатываемой поверхности важную роль играют фактические отклонения от формы и размеров абразивного инструмента. В абразивном инструменте должны быть обеспечены минимальные отклонения от параллельности, перпендикулярности, соблюдены значения радиального и торцового биения, в первую очередь для рабочих и опорных поверхностей, а затем по мере необходимости и для нерабочих. Выполнение этих требований позволяет уменьшить дисбаланс кругов, отрицательно влияющий на эффективность применения инструмента, шероховатость обработанной поверхности и срок службы станка. Однако при назначении точности инструмента всегда необходимо учитывать ее экономическую целесообразность и технологическую выполнимость. В настоящее время на основании практических и научных исследований для некоторых абразивных инструментов определена оптимальная точность, которая регламентируется стандартами.

Шлифовальные круги и головки в соответствии с ГОСТ 4785—64, в котором оговорены технические требования в зависимости от точности размеров, формы и других показателей качества, разделены на классы А и В. Инструмент класса А имеет более высокую точность и качество по сравнению с инструментом класса В. Поля допусков на размеры инструмента класса В в 1,5—2 раза шире, чем на размеры инструмента класса А. Абсолютная величина предельных отклонений при прочих равных условиях допускается более значительной для инструмента с крупными размерами.

В связи с тем, что во многих случаях точность наружного диаметра и высоты абразивных кругов не оказывает влияния на точность обработки, техническими требованиями допускается по согласованию с потребителем поставка кругов с отклонениями от этих размеров, в 3 раза превышающими поле допуска, указанное в ГОСТ 4785—64.

Для обеспечения соосности круга с осью шпинделя большое значение имеет точность изготовления посадочного отверстия. Предельные отклонения размеров отверстия инструмента класса А в зависимости от размера колеблются в пределах от +0,1 до +0,7 мм, а для инструмента класса В от +0,2 до +4 мм. Конусность и овальность отверстия не должны превышать допуска на диаметр. Для лучшей посадки на шпиндель поверхность отверстия круга может быть наращена специальной массой. Наращенный слой по толщине не должен превышать $^1/_{10}$ диаметра для отверстий диаметром до 50 мм и 5 мм для отверстий диаметром более 50 мм и не должен выступать над торцовыми поверхностями инструмента. Вогнутость и выпуклость кругов не должна превышать допуска на непараллельность его торцов. Круги формы Д диаметром 150 мм и более, высотой 1,5 мм и бо-

Форма и осиовные размеры шлифовальных сегментов (ГОСТ 2464—67)

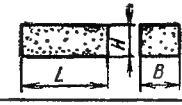
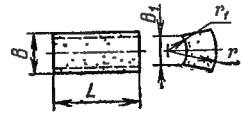
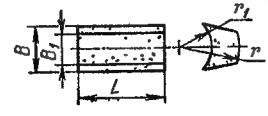
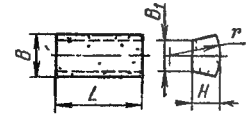
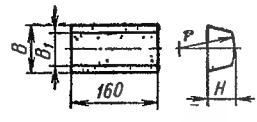
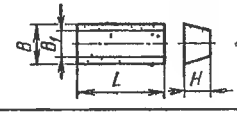
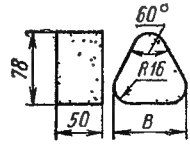
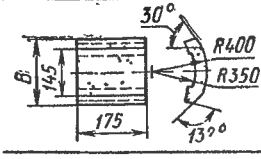
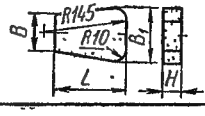
Наименоваиие	Форма	Обозиачение
Плоские		СП
Выпукло-вогнутые		1С
Вогнуто-выпуклые		2С
Выпукло-плоские		3С
Плоско-выпуклые		4С
Трапециевидные		5С
		6С
Специальные		7С
		8С

Таблица 23

Основные размеры в мм					
B	B_1	L	H	r	r_1
45—150	—	60—250	20—50	—	—
(55); 150	40—110	(75); 200	—	85—300	60—250
80; 95	70; 80	125; 175	—	170; 250	150; 220
(110)—380	75—210	100—300	40—250	200—500	—
100; 190	80; 180	—	40; 50	220; 400	—
60; 100	46—85	125; 150	16; 40	—	—
85	—	—	—	—	—
175	—	—	—	—	—
25; 38	75; 95	90; 110	50; 70	—	—

Наименование	Форма	Обозначение
Для шлифования рельс	394, 378, 8, 150, 374, 8, 70, 30, 68	9С

Примечание. В скобках указаны нерекомендуемые размеры.

лее могут иметь одностороннее или двустороннее поднутрение уменьшающее высоту круга от периферии к центру, в пределах допусков по высоте.

Допустимая непараллельность кругов находится в зависимости от зернистости абразивного порошка, вида связки и равна по абсолютному значению 0,1—0,4 мм для инструмента класса А и 0,2—0,8 мм для инструмента класса В. Непараллельность, вогнутость или выпуклость плоских или цилиндрических продольных поверхностей брусков и сегментов в соответствии с ГОСТ 4786—64 не должна превышать в зависимости от размера 0,2—1 мм. Предельные отклонения от номинальных размеров брусков и сегментов класса А могут быть в пределах ±0,2—±3 мм, класса Б — ±0,2—±3 мм.

При маркировке кругов на одной из его сторон в виде сокращенных названий наносят следующие характеристики (рис. 25): на кругах диаметром свыше 60 мм — товарный знак предприятия-поставщика или его сокращенное наименование; на кругах диаметром свыше 250 мм — обозначение типоразмеров, для остальных кругов указывается в сопроводительном документе; на кругах диаметром свыше 40 мм — марку абразивного материала, номер зернистости (при применении смеси номера зернистости маркируются дробным числом) и степень твердости; на кругах диаметром свыше 50 мм — вид связки и номер структуры; на кругах диаметром свыше 150 мм, а также на кругах всех диаметров, работающих со скоростью более 40 м/с, — рабочую окружную скорость (на этих кругах дополнительно наносят диамет-

Рис. 25. Пример маркировки шлифовального круга:

24А — абразивный материал (белый электрокорунд марки 24А); 25П — зернистость; СМ1 — твердость; К — керамическая связка; 5 — структура; ПП — форма круга; 250 — наружный диаметр круга в мм; 25 — высота круга в мм; 76 — диаметр посадочного отверстия в мм; 35 м/с — допустимая рабочая окружная скорость

Продолжение табл. 23

Основные размеры в мм					
B	B_1	L	H	r	r_1
86	—	—	—	—	—

ральную красную полосу); на кругах диаметром свыше 40 мм — класс инструмента; на кругах диаметром свыше 250 мм и высотой свыше 6 мм — класс дисбаланса; на кругах диаметром свыше 250 мм — номер маршрутного листа и номер стандарта. На кругах диаметром до 40 мм маркировка наносится на этикетку, наклеиваемую на коробку или пакет с инструментом. На брусках и сегментах наносят те же данные, что и на кругах, кроме вида связки, номера зернистости, класса дисбаланса, номера маршрутного листа и номера стандарта. Кроме того, на бруски можно не наносить обозначение типоразмера.

Выбор абразивного инструмента

Эффективность использования и качество обрабатываемой детали зависят от правильного выбора характеристики абразивного инструмента. В настоящее время имеются рекомендации, которые позволяют на основании сведений о характеристике шлифуемого материала, величине снимаемого припуска, требуемой точности и шероховатости обработки, режимах обработки, характеристике станка рекомендовать абразивный инструмент с определенным сочетанием его характеристик.

При выборе инструмента для конкретного случая обработки форма, размеры и конструктивные особенности его обусловливаются: формой и размерами обрабатываемых поверхностей; типом и конструкцией станка, на котором предусматривается использование абразивного инструмента; характером и количеством движений, осуществляемых инструментом и деталью в процессе обработки; методом закрепления инструмента на станке и конструктивными особенностями крепежных приспособлений.

Форма рабочей поверхности абразивного инструмента определяется геометрией обрабатываемой поверхности и видом выполняемой операции. Форма сечения инструмента определяется формой рабочей поверхности, местом установки и закрепления инструмента на станке и эксплуатационными факторами. Если при абразивной

обработке основным движением является вращательное, то инструмент имеет форму тела вращения (круги, головки, сборные круги с прерывистой рабочей поверхностью, оснащенные абразивными сегментами), а если возвратно-поступательное, то форму брусков. Форма сечения кругов должна быть такой, чтобы его рабочая поверхность беспрепятственно соприкасалась с обрабатываемой поверхностью. С этой целью, например, круги формы ЧЦ имеют глубокую цилиндрическую выточку. В этой выточке размещаются части крепежного приспособления таким образом, что они не выступают за торцовую поверхность и не мешают при шлифовании плоскостей торцом круга, при заточке инструментов, при внутреннем шлифовании глухих отверстий или отверстий с буртиками. Ограниченное свободное пространство вокруг шлифуемой поверхности вызвало необходимость создания кругов формы ЧК и тарелок. Последние, как правило, используются для заточки многолезвийного инструмента.

Для каждого станка сообразно с его технологическими возможностями определяется размерный интервал обрабатываемых деталей, форма и размеры инструментов, которые могут быть использованы на станке. Форма центральной части кругов определяется, как правило, конструктивными особенностями крепежного приспособления или местом закрепления на шпинделе станка. В настоящее время широко применяются следующие виды закрепления кругов: на шпильке — наклеиванием; на винте; на шпинделе (или оправке) — винтом (гайкой) или фланцами; на переходных фланцах — винтами (гайками) или наклеиванием. Методы и размеры мест закрепления стандартных абразивных инструментов унифицированы и регламентируются ГОСТ 2270—69.

Как уже отмечалось, специальные формы абразивного инструмента применяются лишь в исключительных случаях. При разработке специальных форм необходимо учитывать технологические факторы. В связи с тем, что придание требуемой формы абразивному инструменту в большинстве случаев осуществляется методом формования, конструирование абразивного инструмента требует знания свойств компонентов абразивного пресс-порошка, правил конструирования пресс-форм, порядка и режимов выполнения последующих после прессования технологических операций. Как правило, следует избегать неравномерной толщины стенок, так как, вследствие неравномерной пропрессовки, в процессе спекания (обжига) происходит неравномерная усадка, которая вызывает напряжения, ведущие к короблению и появлению трещин. Следует избегать острых внутренних углов, которые являются концентраторами напряжений в круге. При проектировании инструмента необходимо знать направление, в котором будет осуществлено его формование. Стенки, расположенные в направлении прессования, целесообразно выполнять с уклонами для улучшения условий извлечения инструмента из пресс-формы. Направление прессования целесообразно выбирать со стороны наибольшей плоскости (поверхности) инструмента в сторону наименьшей толщины инструмента. При этом обеспечиваются наи-

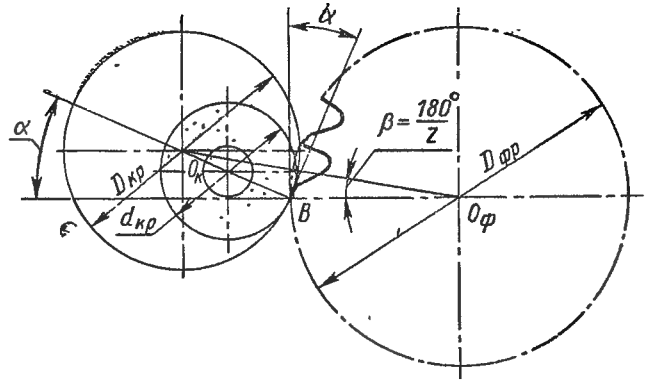


Рис. 26. Схема заточки мелкозубых фрез

Таблица 24

Зависимость диаметра посадочного отверстия от наружного диаметра круга

Наружный диаметр круга D в мм	Диаметр посадочного отверстия круга d в мм	Наружный диаметр круга D в мм	Диаметр посадочного отверстия круга d в мм
4	1,6	63, 80 и 100	20 и 32
5 и 6	2	125, 150	32, 51
8	3	175, 200	32, 51 и 76
10 и 13	4	250	32, 76 и 127
16 и 20	6	300	76, 127
25	10	350, 400 и 450	127 и 203
32	10 и 13	500	203 и 305
40	13 и 16	600, 750, 900 и 1060	305
50	16 и 20	1250, 1400 и 1600	508

лучшие условия для равномерной пропрессовки. В теле инструмента следует избегать поднутрений и выступов, расположенных в направлении, перпендикулярном к направлению прессования.

Выбор формы и размеров абразивного инструмента и их взаимосвязь с обрабатываемой деталью рассмотрим на примере заточки мелкозубых фрез по задней поверхности кругами формы ПП (рис. 26). Для повышения стойкости круга диаметр его желательно выбирать большим. Однако при заточке фрезы с большим числом зубьев кругом большого диаметра можно задеть соседний зуб. Сместить же ось дискового шлифовального круга относительно центра детали нельзя, так как при этом увеличивается задний угол. Следовательно, диаметр круга прямого профиля находится в определенном соотношении с диаметром и числом зубьев затачиваемой фрезы. Из треугольника $O_к O_ф B$ (рис. 26) определяем, что диаметр абразивного круга не должен быть больше величины, подсчитанной по формуле

$$D_{кр} = \frac{D_{фр} \sin \frac{180°}{z}}{\sin\left(\alpha - \frac{180°}{z}\right)}.$$

На основании проверочного расчета выбирают стандартный круг, наружный диаметр $d_{кр}$ которого приближается к расчетному значению, но не превышает его. Применяя абразивный инструмент и выбирая его размерные параметры, всегда необходимо руководствоваться предпочтительными рядами чисел.

В табл. 24 в соответствии с рекомендациями перспективного типажа абразивного инструмента для стран СЭВ показана зависимость диаметра посадочного отверстия от наружного диаметра шлифовальных кругов.

§ 2. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

В производстве абразивных инструментов применяется большое количество механизированного и автоматизированного оборудования для приготовления смеси, формования изделий, термической обработки и механической обработки. Такое оборудование можно использовать на базе специализации заводов на выпуске однотипной продукции, использования типовых технологических процессов и единых рецептур связки. Связка в исходном состоянии приготовляется, как правило, в виде порошка. Это позволяет при смешивании с абразивным зерном обеспечить равномерность распределения компонентов по всему объему инструмента. В некоторых случаях применяют и другие приемы. Например, при изготовлении абразивных лент и шкурок абразивные зерна закрепляют на поверхности тканевых основ в слое клеящего вещества.

Последовательность и режимы выпонения операций, применяемое оборудование и оснастка определяются многими факторами, среди которых основную роль играют материал связки, форма и размер инструмента, серийность производства.

Изготовление инструмента на керамической овязке

Керамическая связка получается в результате полного или неполного сплавления твердых веществ, главным образом окислов, во время термической обработки (обжига) при высокой температуре. Основными характеристиками керамических связок являются: плавкость, реакционная способность, вязкость, коэффициент термического линейного расширения, теплопроводность, модуль упругости и механическая прочность. Некоторые из этих характеристик, например, коэффициент линейного расширения, модуль упругости и прочность, во многом определяют эксплуатационные свойства изделий. Такие характеристики, как плавкость, определяемая температурой размягчения связки, реакционная способность, характеризующая степень взаимодействия связки с абразивным зерном, вязкость и другие, существенно влияют на выбор технологических режимов изготовления. Изменение свойств керамических связок достигается изменением химического состава связки и технологии изготовления.

Различают плавящиеся и спекающиеся керамические связки. Плавящиеся связки в основном применяются при изготовлении абра-

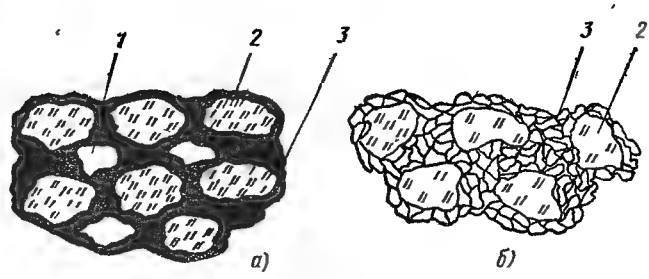


Рис. 27. Схема закрепления абразивных зерен керамической связкой:

1 — пора; *2* — абразивное зерно; *3* — связка

зивных инструментов из электрокорунда. В результате процессов, происходящих при обжиге этих связок, они целиком превращаются в стекло. Взаимодействуя с электрокорундом, плавящиеся связки растворяют его поверхность, образуя твердые растворы, что обеспечивает после охлаждения прочное сцепление зерна со связкой. Количество связки при этом может быть небольшим. Некоторое сплавление зерен абразива не снижает режущей способности инструмента. Схема скрепления абразивных зерен плавящейся связкой показана на рис. 27, *а*. Плавящиеся связки не применяют для изготовления инструмента из карбида кремния. При расплавлении связки и взаимодействии образовавшейся жидкой фазы с зернами карбида кремния последний разлагается с образованием кремния и углерода. Тонкая пленка углерода на поверхности снижает прочность закрепления зерен в связке. Поэтому при выпуске инструмента из порошков карбида кремния применяют спекающиеся керамические связки.

Спекающиеся связки (фарфоровидные) только частично плавятся в процессе обжига. Они не вступают во взаимодействие с абразивным зерном, не разрушают его поверхность. Прочность удержания зерен в этом случае в основном определяется механическими свойствами связки, частицы которой припекаются друг к другу (рис. 27, *б*). Для обеспечения высокой прочности удержания абразива в спекающейся связке количество ее в единице объема инструмента принимается в 2—3 раза больше, чем плавящейся. Состав связки подбирается так, чтобы во время обжига образовывалось небольшое количество жидкой фазы, застывающей при охлаждении. Это повышает прочность закрепления зерен.

В процессе изготовления инструмента из сыпучей абразивной формовочной массы получается высокопрочное жесткое тело определенной формы и геометрических размеров. Для этого приготовляют шихту (абразивную формовочную массу), состоящую из смеси компонентов связки, абразивных зерен и клеящего вещества. Затем полученную массу спрессовывают в брикет, форма и размеры которого близки к окончательным. После прессования производят термическую обработку, сушку и обжиг для придания инструменту высокой прочности и механическую обработку для обеспечения заданной точности формы и размеров (рис. 28).

Приготовление абразивных формовочных масс. Цель этого этапа — получение однородной по составу и плотности смеси всех компонен-

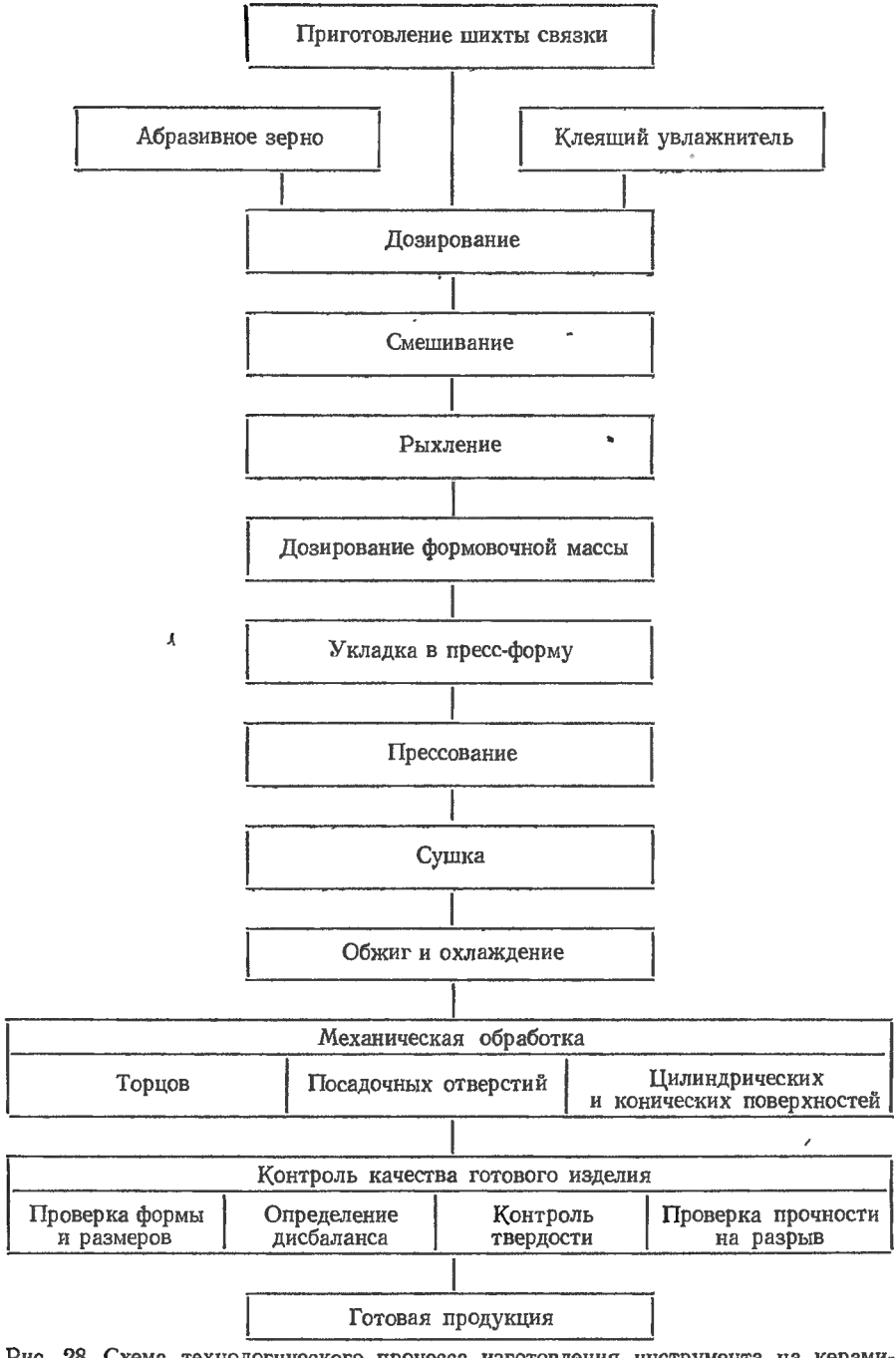


Рис. 28. Схема технологического процесса изготовления инструмента на керамической связке

тов шихты связки, абразивного зерна и увлажняющего клеящего вещества. Инструменты различной твердости и структуры изготовляют с использованием шихты связки одного состава, изменяя соотношение объемов зерна, связки и пор. Абразивная формовочная масса готовится в два приема: вначале смешивают компоненты шихты связки, а затем компоненты абразивной формовочной массы. Различают однокомпонентные и многокомпонентные связки. В качестве однокомпонентных связок могут быть использованы материалы вулканического происхождения — перлит и обсидиан. В современном производстве абразивных инструментов в основном используются многокомпонентные связки из смеси различных керамических материалов: глины, полевого шпата, пегматита, талька, кварца и др. Изменяя рецептуру шихты связки и ее состав, можно в широких пределах варьировать свойства получаемого в результате обжига керамического материала. В табл. 25 в качестве примера приводится соотношение компонентов шихты некоторых керамических связок.

Таблица 25

Составы керамических связок

Связка	Обозначение	Состав (глина 30%)			Материал инструмента
		Тальк	Полевой шпат	Борное стекло	
Плавящаяся	К5	—	35	35	Электрокорунд
	51б	10	20—27	33—40	
	К8	12	58	—	
Спекающаяся	К	—	70		Карбид кремния

Порошки керамических веществ при обычных условиях не спрессовываются в прочные брикеты даже при больших давлениях. Формовать их можно только с использованием клеящих добавок и увлажнителей: декстрина, жидкого стекла и др. Некоторые из этих веществ выгорают при обжиге, другие, например жидкое стекло, сплавляются с компонентами связки, и изменение химического состава связки за счет этого должно быть учтено при составлении рецептуры. Химический состав наиболее распространенных связок приведен в табл. 26.

Применяемые материалы. Химический состав связки и свойства образующегося после обжига материала зависят от качества исходных материалов: глины, плавней, клеящих веществ и др.

Глина представляет собой широко распространенную осадочную горную породу, в основном состоящую из каолинита и других глинистых материалов (водных алюмосиликатов) с величиной частиц менее 0,01 мм. При нагревании увлажненной глины вначале испаряется введенная извне вода, а при температуре более 500° С удаляется химически связанная вода. При дальнейшем нагреве оплавляются легкоплавкие примеси и образуется жидкая фаза. С образо-

Химический состав связок

Таблица 26

Обозначение	Состав в %					
	Al_2O_3	SiO_2	MgO	K_2O	Na_2O	B_2O_3
51[б]	16,4	63,2	3,5	2,4	2,2	5,8
К8	17,4	64,5	3,4	2,8	3,2	—
К	23,0	60,5	0,4	7,6	2,6	—
64[б]	27,0	52,0	2,05	6,1	6,1	2,5
70[а]	16,2	65,2	0,7	—	9,8	6,2
67[б]	20,0	59,0	2,0	3,2	3,8	4,0

ванием жидкой фазы при повышении температуры начинается уплотнение (усадка) спрессованного брикета до полного исчезновения пор. В результате происходящих при обжиге сложных физических и химических процессов прочность спрессованного изделия существенно повышается. Для изготовления абразивных инструментов применяют высококачественную глину с небольшим количеством примесей. Так, например, в глинах Латнинского месторождения содержится до 49% SiO_2, 36% Al_2O_3, 0,48% Fe_2O_3, 0,87% CaO, 0,53% прочих окислов. Несколько отличается по составу глина Челябинского месторождения, которая содержит большое количество примесей — 2,8% против 1,9% у Латнинской глины.

Важными характеристиками глины являются пластичность, связующая способность и огнеупорность. Пластичность зависит от химического и минерального состава глины, формы и дисперсности частиц, образующих массу. Пластичность характеризует способность глиняного теста принимать под воздействием внешних сил определенную форму. Пластичные глины поглощают при смешивании большое количество (18—50%) воды, которая тонкой пленкой покрывает каждую частицу. Чем мельче частицы, входящие в состав глины, тем больше влаги поглощается при замешивании и тем пластичнее материал связки.

Связующая способность глин характеризуется повышением прочности отформованного тела за счет возникающих при сушке сил сцепления между частицами массы. В производстве абразивного инструмента используются пластичные глины, обладающие высокой связывающей способностью.

Огнеупорность глин зависит от химического состава, дисперсности частиц и условий нагрева. Чем больше в составе глины окисла Al_2O_3 и чем меньше размер частиц, тем выше ее огнеупорность. Так как глины являются механической смесью веществ, имеющих различную температуру плавления, то они расплавляются в интервале температур. Поэтому под огнеупорностью глины понимают температуру существенного размягчения. По огнеупорности глины

условно разделяются на огнеупорные с температурой плавления выше 1580° С, тугоплавкие с температурой плавления 1380—1580° С, легкоплавкие с температурой плавления менее 1380° С. Для изготовления абразивных инструментов используют тугоплавкие и огнеупорные глины с температурой размягчения выше 1580° С. В некоторых случаях для повышения пластичности абразивных формовочных масс и снижения температуры обжига в их состав вводят небольшое количество легкоплавкой бентонитовой глины. Легкоплавкие глины содержат в своем составе большое количество окислов железа и кальция. Эти материалы являются вредными примесями. Поэтому для снижения температуры обжига в состав шихты лучше вводить не содержащие вредных примесей вещества — плавни — с относительно низкой температурой плавления. Такие материалы, помимо снижения температуры, повышают реакционную способность связок. В промышленном производстве абразивных инструментов в качестве плавней применяют полевой шпат, тальк, борное стекло.

Полевые шпаты — минералы белого, красноватого, серого и других цветов. Для приготовления шихты связки используют калиевый полевой шпат — ортоклаз $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$. Полевой шпат размягчается при температуре 1200—1250° С. Полное расплавление наступает при температуре выше 1500° С. В последнее время проведены работы по замене полевого шпата стеклом вулканического происхождения — перлитом.

Тальк имеет более высокую по сравнению с полевым шпатом огнеупорность 1500—1550° С. В процессе спекания он образует с компонентами связки легкоплавкие эвтектики, что снижает температуру обжига. В состав талька входят окислы магния, кремния, примеси и связанная вода. Из-за удаления ее потери в весе при прокаливании составляют 4—8%. Взамен талька могут применяться и другие минералы, содержащие в своем составе окись магния, например магнезит.

В состав специально приготовляемого борного стекла, используемого для снижения температуры обжига связки, входят окислы SiO_2, NaO, B_2O_3. Борное стекло обладает в отличие от природных материалов высокой стабильностью химсостава. При использовании этого материала повышается стабильность качества инструмента. Для применения в качестве компонента шихты связки сваренное борное стекло после охлаждения дробится и просеивается на ситах.

В качестве увлажняющих, клеящих добавок (временного связующего) применяют жидкое стекло и декстрин. Жидкое стекло используется в основном для крупнозернистых масс. Оно готовится растворением в воде материала, получаемого при сплавлении кварцевого песка с содой или сульфатом натрия. Этот сплав напоминает по виду обыкновенное стекло зеленоватого или голубоватого оттенка и называется «силикат-глыбой». Важной характеристикой силикат-глыбы является силикатный модуль, характеризующий отношение числа грамм-молекул SiO_2 к числу грамм-молекул Na_2O. Модуль определяет огнеупорность материала и, как правило, равен 2,6—3. Силикат-глыбу для получения жидкого стекла растворяют в кипящей воде

до получения 50% раствора, который после отстаивания примесей разбавляется до плотности 1,48—1,5 г/см³. Приготовленное таким образом жидкое стекло вязкой консистенции имеет следующий состав: 32—34,5% SiO_2, 11—13,5% Na_2O, не более 0,25% Fe_2O_3 + + Al_2O_3; не более 57% H_2O; не более 0,4% прочих примесей.

Жидкое стекло разлагается при хранении из-за взаимодействия с углекислотой воздуха. Поэтому приготовленный раствор хранят в герметичных сосудах. Используя жидкое стекло в качестве клеящей добавки, следует иметь в виду, что при нагревании оно вначале теряет воду и затем при температуре около 800° С начинает плавиться. Окислы, входящие в состав стекла, взаимодействуют в расплавленном виде с другими материалами связки. Излишнее количество жидкого стекла может привести к большой усадке брикета и короблению его из-за большого количества образующейся жидкой фазы. В связи с этим необходимо тщательно контролировать количество жидкого стекла, вводимого в состав абразивной формовочной массы.

Декстрин применяют при изготовлении мелкозернистых формовочных масс. Декстрин — порошок светло-желтого цвета, хорошо растворимый в воде. Получают декстрин гидролизом крахмала. Насыпная масса декстрина в порошке составляет 0,45—0,55 г/см³. В процессе формования и сушки инструмента на керамической связке декстрин служит связующим веществом. Во время обжига он плавится при температуре около 225° С и выгорает при температуре более 500° С. Промышленностью выпускаются несколько сортов декстрина, пригодных для применения в производстве абразивных инструментов. Преимущественно используют палевый и желтый декстрин, несколько различающиеся растворимостью в воде и клеющей способностью.

В поступающем в производство порошке декстрина содержание влаги не должно превышать 10%, а содержание золы 0,4—0,6%. При большем количестве влаги материал комкуется. Для приготовления абразивных инструментов используют декстрин в сухом состоянии или в водном растворе. Раствор декстрина приготовляют в специальных котлах с подогревом до 80° С. В результате получают жидкость, которую процеживают через сита для удаления комков. Плотность раствора зависит от концентрации и изменяется от 1,08 до 1,3 г/см³ при повышении концентрации от 20 до 60%. Приготовленный раствор быстро густеет и разлагается. Хранить его более двух суток нельзя.

Сульфитный щелок применяется как заменитель декстрина. Его получают при переработке древесины в целлюлозу. Сульфитный щелок растворяется в воде и обладает хорошими клеящими свойствами. При нагревании сульфитный щелок выгорает практически без остатка. Применяемый в производстве абразивного инструмента 50%-ный раствор щелока имеет плотность 1,26—1,28 г/см³.

Приготовление шихты связки. Шихта керамической связки состоит из небольших по размеру твердых частиц керамических материалов. При нагреве спрессованного из такой

смеси брикета вначале размягчаются наиболее легкоплавкие компоненты. Расплавляясь, они взаимодействуют с твердыми и растворяют их. Образующиеся при этом соединения имеют более низкую температуру плавления по сравнению с исходными, и в обжигаемом теле при нагреве растет количество жидкой фазы. По мере дальнейшего нагрева жидкая фаза вступает во взаимодействие с другими твердыми частицами, составляющими брикет, в том числе и с абразивными зернами. В результате действия сил поверхностного натяжения на границе между жидкой фазой и твердыми частицами происходит процесс усадки всего изделия. При постепенном охлаждении обожженного тела образовавшееся при оплавлении стеклообразное или фарфоровидное вещество затвердевает, прочно закрепляя абразивные зерна. От равномерности распределения компонентов во всем объеме связки зависит однородность свойств: твердость и плотность обожженного инструмента.

Равномерность состава шихты связки по всему объему может быть достигнута путем смешивания предварительно измельченных компонентов или совместного сплавления (фриттования) их при высокой температуре с последующим дроблением.

Порошки можно смешивать мокрым и сухим способами. Мокрый способ приготовления шихты связки включает операции дозирования дробленых компонентов и смешивания их в присутствии большого количества воды (до 60%) в барабанных смесителях в течение более 8 ч. Приготовленная масса, называемая шликерной, высушивается и дробится до требуемой крупности частиц. Полученный порошок имеет однородный химический состав. Мокрый способ приготовления шихты редко применяется в абразивной промышленности из-за больших трудозатрат и сложности оборудования На высушивание шликера затрачивается большое количество тепла.

Сухое смешивание компонентов обеспечивает однородность состава шихты связки только при использовании тщательно измельченных материалов. Способ измельчения зависит от состава материала компонента. Например, высушенную предварительно при температуре 150—200° С до влажности не более 1% глину измельчают на зубчатых вальцах и затем в шаровых мельницах. Полевой шпат перед помолом прокаливают при температуре 800—1000° С и последовательно измельчают на щековых, валковых или молотковых дробилках и шаровых мельницах. Компоненты шихты связки после дробления должны быть сухими. Наличие влаги более 1,5% в глине или 0,5% в остальных материалах может привести к некачественному смешиванию их из-за комкования.

Материалы, входящие в состав шихты, при сухом смешивании дозируются весовым методом. Точность дозирования должна быть высокой, так как соотношение компонентов во многом определяет качество связки. Если в связке содержится больше, чем предусмотрено рецептурой, легкоплавких веществ, то при обжиге увеличивается количество жидкой фазы. Это может привести к сильному уплотнению брикета, завышению твердости инструмента, деформации его из-за чрезмерного размягчения массы. В изделиях из зеле-

ного карбида кремния излишнее количество жидкой фазы приводит к разложению его и появлению во внутренних частях обожженного брикета черных пятен. Окисление продуктов разложения карбида кремния вызывает также образование пузырчатой пленки на поверхности изделий. Недостаточное количество плавней в составе шихты по сравнению с заданным приводит к снижению твердости и механической прочности инструмента.

Для получения высокой степени однородности смешивание шихты связки производят в шаровых мельницах, облицованных кремневыми пластинами. Материал загружают в барабан вместе с фарфоровыми или кремневыми шарами в соотношении 1 : 1 по массе. Это обеспечивает дополнительное измельчение компонентов. Регулируя время смешивания, можно менять зернистость связки. При загрузке материала в смеситель соблюдают такую последовательность: вначале загружают полевой шпат, борное стекло и другие непластичные материалы с кремневыми шарами; после 10—40 ч смешивания — глину, тальк и производят совместный помол в течение 2—10 ч. Готовую шихту связки просеивают через сито с ячейками 0,5—0,8 мм.

Качество приготовленной смеси контролируют по однородности и химическому составу. Однородность смешивания проверяют под микроскопом, а состав связки — анализом. Химический анализ — длительная и дорогая операция — производится периодически. Более ускоренным, но менее точным является контроль огнеупорности материала связки, зависящей от ее химического состава. Связка считается годной, если огнеупорность пирамиды, изготовленной из нее, соответствует заданной. Приготовленная шихта связки хранится в герметичной таре: в мешках из бумаги и прорезиненной ткани, в металлических ящиках. Время хранения шихты связки не должно превышать 10 суток. Связки при хранении могут расслаиваться из-за различия в плотности материала компонентов. Возможности регулирования и корректировки состава шихты при сухом смешивании ограничены, так как в качестве основных компонентов используется минеральное сырье. Этих недостатков лишены связки, приготовленные фриттованием (сплавлением).

Фриттованию подвергаются все материалы, предварительно измельченные до крупности 1—1,5 мм. Это делается для получения высокой степени однородности связки по составу. После дозирования компонентов сырье смешивают и сплавляют при температуре выше 1300° С до получения однородной массы. При приготовлении фритты для обеспечения точного состава можно регулировать соотношение компонентов по результатам химического анализа исходного сырья. После нагрева и выдержки при заданной температуре расплавленную массу фритты выливают в воду и дробят затем на щековой и валковой дробилках и в шаровой мельнице. В результате просеивания получают мелкодисперсную высококачественную шихту связки, состоящую из частиц однородного материала. К преимуществу фриттования следует отнести и то, что после предварительного сплавления компонентов температура обжига массы при про-

чих равных условиях может быть снижена. Недостаток фриттования — в его большой трудоемкости. При изготовлении высококачественных инструментов класса А фритта добавляется в состав связки, как один из компонентов.

Приготовление керамических абразивных формовочных масс. Абразивные массы для формования приготовляют смешиванием абразивного зерна, связки и увлажнителя, взятых в определенном весовом соотношении. Объемное количество зерна в связке обусловлено заданной структурой инструмента. Принято, что инструмент структуры № 1 должен в своем объеме содержать 60% зерна. С увеличением номера структуры на единицу это количество пропорционально уменьшается на 2%, так что инструмент со структурой № 2 содержит 58% абразивного порошка, № 3 — 56% и т. д. По известному номеру структуры количество абразивного зерна для изготовления инструментов без учета потерь может быть рассчитано по формуле

$$G_з = V_и [60 - 2(N - 1)] \frac{\gamma_з}{100},$$

где $\gamma_з$ — плотность абразивного материала в г/см³;
$V_и$ — объем инструмента в см³;
N — номер структуры.

Количество связки определяет прочность удержания зерна и твердость инструмента: чем больше связки, тем больше прочность удержания зерен и выше твердость. Необходимое для обеспечения заданной твердости инструмента количество связки определяется экспериментально. Для этого изменяют объем связки при неизменном объеме зерна и определяют, как меняется твердость инструмента. На основании этих данных составляют расчетные таблицы, в которых указывают объемное процентное содержание связки для различных значений твердости и структуры. Как правило, с изменением объема обожженной связки на 1,5—2% твердость инструмента меняется на одну степень. Зная объем инструмента $V_и$ и процентное содержание связки η, можно подсчитать массу связки:

$$G_{св} = V_и \frac{\eta}{100} \gamma_{св},$$

где $\gamma_{св}$ — плотность связки в г/см³.

При составлении рецептур масс количество шихты связки должно быть увеличено против расчетного на 5—6%, так как при обжиге удаляется связанная вода, входящая в состав компонентов, например, глины.

Количество клеящих веществ, вводимых в состав абразивной формовочной массы, определяется следующим образом. Установлено опытным путем, что для получения достаточной прочности отформованного брикета на каждые 100 весовых частей сухой связки надо добавить не более 30—35 весовых частей жидкого стекла или 10—30 весовых частей 20—60%-ного раствора декстрина. Излишнее и недостаточное увлажнение шихты уменьшает прочность брикета.

При использовании жидкого стекла, переходящего при обжиге в состав связки, большее по сравнению с расчетным количество его приводит к завышению твердости. Небольшое количество клеящих веществ добавляется и на смачивание абразивного зерна: на 100 весовых частей зерна примерно 1,4 весовых частей увлажнителя.

Процесс приготовления абразивных формовочных масс включает дозирование компонентов, смешивание их и разрыхление. От точности дозирования зависит во многом качество инструментов. Как было показано выше, изменение количества связки на 1,5% меняет твердость изделия на одну степень. Так как твердость инструментов является важнейшей эксплуатационной характеристикой, точность дозирования связки должна быть высокой. Для дозирования шихты связки и абразива используют весовые дозаторы. Жидкое стекло и раствор декстрина можно дозировать по объему механическими поршневыми дозаторами.

Качество приготовления абразивной формовочной массы определяется точностью химического состава, равномерностью распределения абразивных зерен, связки и увлажнителя по всему объему. При некачественном смешивании и применении неоднородных масс связки и увлажнителя в готовых изделиях могут появиться дефекты. Смешивание абразивных масс усложняется тем, что в состав их входят сыпучие вещества, значительно различающиеся по крупности частиц, плотности и насыпной массе.

Смешивание может быть выполнено в смесительных агрегатах и шаровых мельницах. В первом случае одновременно со смешиванием сыпучих компонентов в шихту добавляют увлажнитель, который препятствует расслоению компонентов во время хранения и засыпки, улучшает прессуемость шихты. Такой процесс пригоден для приготовления крупнозернистых масс из абразивных порошков № 16 и крупнее. Для смешивания мелкозернистых масс из абразивных порошков № 12 и мельче эта технология не может быть использована, так как увлажненные мелкие частицы абразива слипаются в комки. Для предотвращения комкования приготовляют сухую смесь абразивного порошка, связки и декстрина в шаровой мельнице, а затем увлажняют шихту водой. Приготовление абразивной формовочной массы на специализированных заводах полностью механизировано. Чтобы не допустить попадания крупных частиц абразива в шихту с мелким абразивным порошком, оборудование закрепляется для смешивания масс с определенной зернистостью абразивных порошков. Таким образом уменьшается количество чисток оборудования при переходе на другие зернистости, что облегчает обслуживание.

Крупнозернистые абразивные формовочные массы приготовляют в специальных лопастных смесителях с вращающейся чашей типа СМ-100, СМ-200, СМ-400 и на массоприготовительных агрегатах МА200, МА100, АМА-400 (цифра соответствует емкости чаши в кубических дециметрах) производительностью 0,6—1,2 т/ч.

В массоприготовительный агрегат входят расходные емкости для хранения компонентов, дозирующие устройства, смесительные

и протирочные машины. Оборудование обычно имеет вертикальную планировку, что позволяет отказаться от транспортирующих устройств для перемещения абразивной массы. Подача компонентов в дозаторы и в смесительную машину, абразивной массы на протирку и в вагонетки при вертикальном расположении оборудования происходит самотеком. Во всех машинах процесс смешивания осуществляется при непрерывном перемещении загруженных в чашу компонентов.

Первоначально в чашу подают зерно и увлажнитель, которые в течение некоторого времени перемешивают. Предварительное смешивание абразивного порошка с увлажнителем способствует равномерному обволакиванию каждого зерна частицами связки, засыпаемой в смеситель. Описанный порядок загрузки компонентов следует соблюдать и при приготовлении формовочной массы на других агрегатах. После смешивания шихту выгружают и протирают через сита.

При этом формовочную массу разрыхляют и освобождают от комков и крупных частиц. Протирку производят через сита с крупными (1—2,5 мм) ячейками. Применять более мелкие сита не следует, так как при просеивании обнажатся абразивные зерна от налипших частиц связки, что нежелательно.

Мелкозернистые массы приготовляют в отдельном помещении изолировано от крупнозернистых. К качеству их приготовления предъявляются повышенные требования, так как мелкозернистый инструмент применяется на отделочных заключительных операциях обработки почти готовых изделий.

Мелкозернистые абразивные массы смешивают всухую в шаровых мельницах, поверхность которых футеруется керамическими плитами. Время смешивания изменяется от 0,5 до 5 ч при переходе от крупных к мелким зернистостям. В шаровую мельницу загружают вместе с шихтой связки и абразивом кремневые шары диаметром 40—70 мм в соотношении по массе 1 : 4. Это улучшает смешивание и обеспечивает доизмельчение связки. Чтобы улучшить формуемость мелкозернистых масс, после смешивания их увлажняют в смесительных машинах, оборудованных устройствами для подачи точного количества воды.

Для придания мелкозернистым массам высокой однородности и удаления случайно попавших осколков шихту протирают через сита, с размером ячеек 0,4—0,5 мм, на специальных протирочных машинах. После каждого замеса мелкозернистой массы оборудование и шары должны быть тщательно зачищены от остатков шихты. Увлажненные и протертые абразивные формовочные массы хранят в герметичных емкостях не более 24 ч. При большей длительности естественное удаление влаги приводит к пересушке смесей. При формовании из такой смеси брикетов происходит их расслаивание.

Контроль качества приготовления абразивных формовочных масс производится в течение всего технологического цикла. Это необходимо для предотвращения брака, выявляемого иногда лишь на окон-

чательных операциях механической обработки обожженных изделий. Особое внимание следует обращать на химический состав исходного сырья, точность дозирования компонентов шихты и формовочной массы, отсутствие загрязнений и тщательность соблюдения технологических режимов времени смешивания, коэффициента заполнения объема смесителей и т. д. После проверки качественная смесь передается на участок формования.

Формование инструмента. Формованием получают заготовки (брикеты) инструментов, близкие по форме и размерам к готовому изделию с равномерной плотностью по всему объему. При формовании абразивных изделий предусматриваются припуски на механическую обработку после обжига. Для кругов диаметром 100—1100 мм припуск по высоте составляет 2—15 мм, по диаметру 1—10 мм. В некоторых случаях, например при изготовлении небольших кругов, применяют формование в размер без припусков на обработку. Существует два метода формования абразивных изделий: шликерное литье и прессование.

Для литья приготовляют абразивные формовочные массы, содержащие до 80% воды. Из массы отливают в форме болванку и вырезают из нее после сушки заготовку будущего инструмента. При формовании методом литья исключается необходимость использования прессов и сложной оснастки. Основные недостатки метода таковы. Для придания заготовке прочности при сушке в состав массы вводят большое количество глины и крахмальный клейстер. Из-за усадки массы, содержащей большое количество воды, при сушке возникают трещины. Даже при большой вязкости массы плотность по высоте отливки неравномерна и нижние слои содержат больше абразивного зерна, чем верхние. Поэтому для обеспечения стабильных параметров изделий предусматривают значительно бо́льшие припуски на механическую обработку заготовок после обжига, чем при прессовании. Несмотря на кажущуюся простоту процесса шликерное литье применяется редко, в основном для изготовления крупногабаритных кругов.

Прессование заготовок в пресс-формах на гидравлических или механических прессах и формовочных агрегатах имеет существенные преимущества перед литьем. В этом случае используются полусухие формовочные массы и удаление влаги из них не представляет затруднений. Точность заготовок, получаемых в пресс-формах, значительно выше, чем при литье, легко регулируется структура инструмента. Поэтому прессование в настоящее время практически вытеснило литье даже при изготовлении крупногабаритных инструментов.

Прессование керамических формовочных масс подчиняется общим закономерностям прессования порошковых тел. Так как в состав шихты, используемой для прессования брикетов абразивного инструмента, входят непластичные материалы, уплотнение в основном обуславливается более плотной укладкой частиц, а прочность брикета — наличием в связке пластичной глины, клеящих веществ и увлажнителя. Изменение объема увлажненной формовочной абра-

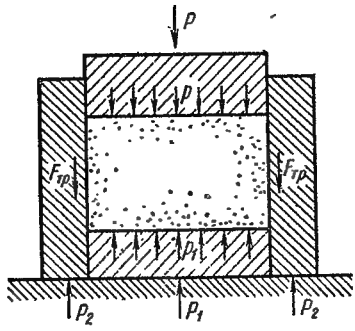


Рис. 29. Схема разложения сил при прессовании порошковых тел

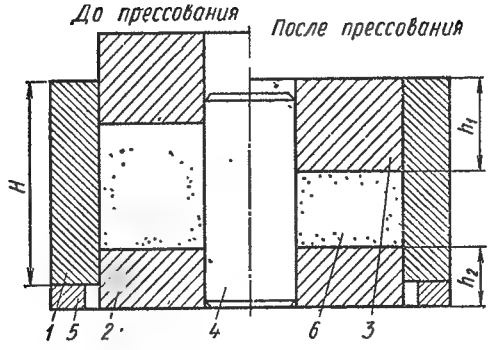


Рис. 30. Пресс-форма для прессования кругов прямого профиля по схеме «до упора»:

1 — обойма; *2* — нижний пуансон; *3* — верхний пуансон; *4* — центрирующий палец; *5* — подкладное кольцо; *6* — изделие

зивной массы при брикетировании характеризуется коэффициентом спрессовывания

$$K = \frac{H_{зас}}{H_{бр}},$$

где $H_{зас}$ — высота абразивной массы после засыпки в пресс-форму в мм;

$H_{бр}$ — высота получаемого брикета в мм.

Для крупнозернистых масс $K = 1{,}6 \div 1{,}8$, для мелкозернистых — $K = 2{,}5 \div 2{,}8$. При одностороннем прессовании порошковых тел часть силы прессования передается через обойму пресс-формы на плиту пресса. Это объясняется возникновением сил трения F между брикетом и стенкой пресс-формы (рис. 29). Сила P, приложенная к верхнему пуансону, создает давление $p = \frac{P}{F}$ на верхней плоскости брикета. На нижний пуансон при этом передается сила $P_1 = P - F_{тр}$, и давление в нижней части брикета $p_1 = \frac{P_1}{F}$ будет меньше давления p. Из-за этого при прессовании участки брикета, прилегающие к верхнему пуансону, имеют большую плотность, чем нижние. Так как неравномерная плотность вызывает неравномерный износ кругов, для выравнивания плотности по высоте применяют различные приемы и приспособления.

Пресс-формы для прессования шихты, как правило, предусматривают прессование «до упора» (рис. 30). При точном весовом дозировании это обеспечивает точный объем заготовки и заданную пористость, что важно для получения инструмента определенной твердости.

При прессовании до упора верхний пуансон *3*, уплотняющий массу, перемещается до тех пор, пока торец его не сравняется с торцом обоймы *1*. Высота h_1 верхнего пуансона должна быть такой,

чтобы обеспечивалось уплотнение массы до заданной плотности. Высота обоймы пресс-форм для изготовления кругов

$$H = h_1 + h_2 + h_{изд},$$

где h_1 — высота верхнего пуансона в мм;
h_2 — высота нижнего пуансона в мм;
$h_{изд}$ — высота отформованного изделия (круга) в мм.

Прессование «до упора» кругов одного диаметра разной высоты в одной пресс-форме осуществляют с использованием стальных закаленных прокладок *5*, высота которых зависит от размера круга. Для уменьшения высоты прессованного изделия прокладку укладывают на верхний пуансон, для увеличения — на обойму. Формование в размер может быть выполнено и без прокладок при точной остановке ползуна пресса на заданной высоте. Момент остановки определяется положением конечного выключателя, отключающего гидронасосы пресса.

Если при прессовании «до упора» массы будет больше расчетного, может произойти поломка пресс-формы или ее деформация. Этого недостатка лишена схема прессования «по давлению» (рис. 29). В этом случае заранее опытным путем определяют давление, приложенное к формуемой массе, при котором обеспечивается заданная высота, а следовательно, и плотность брикета. По известному давлению определяют силу прессования. При формовании абразивных инструментов на гидравлических прессах, снабженных устройствами для регулирования силы, процесс прессования прекращают по достижении ранее рассчитанной силы.

Детали пресс-форм изготовляют из инструментальной стали и затем закаливают. Поверхности деталей, подвергающихся интенсивному абразивному износу, шлифуют и хромируют. Рабочие поверхности пресс-формы периодически перед засыпкой массы смазывают смазкой, содержащей графит. Это уменьшает трение массы о стенки, способствует уменьшению сил прессования. Долговечность пресс-форм зависит от тщательности обращения с ними, состояния оборудования, состава формуемых масс. При эксплуатации детали пресс-форм интенсивно изнашиваются. Допустимая величина износа регламентируется в технологических инструкциях, действующих на заводах. Так, по данным Запорожского абразивного комбината начальный зазор между подвижными деталями пресс-формы изменяется от 0,2 мм на сторону для кругов диаметром 100 мм до 0,6 мм для кругов диаметром 600—1100 мм. Допускается увеличение зазора при износе на 0,1—0,7 мм. Выработка на цилиндрической поверхности кольца не должна превышать 0,2—0,4 мм, оправки — 0,1—0,2 мм. На плитах, формующих торцы кругов, допускается прогиб или выпуклость не более 0,15 мм при формовании кругов диаметром 100—200 мм и 0,7 мм — для кругов 900—1100 мм. С целью упрощения ремонта пресс-форм конструктивно предусмотрено выполнение наиболее быстро изнашивающихся деталей составными. Например, в обойму пресс-форм вкладывают тщательно подогнанное кольцо толщиной 2—3 мм, которое после износа меняют.

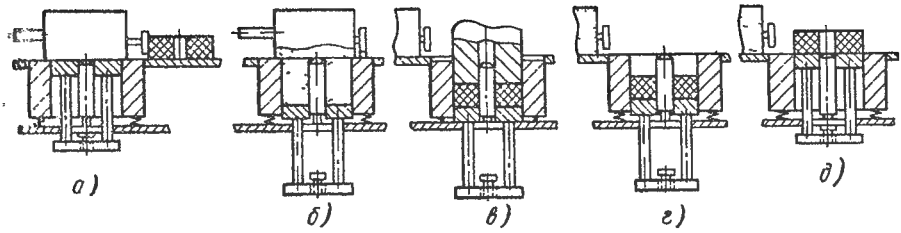


Рис. 31. Схема операции формования кругов на агрегате АФА-3:

а — удаление брикета; *б* — засыпка шихты; *в* — прессование; *г* — подъем пуансона; *д* — выталкивание брикета

Формование абразивных формовочных масс в пресс-формах включает следующие операции: сборку пресс-формы, дозирование, засыпку и разравнивание формовочной смеси, уплотнение шихты в пресс-форме, извлечение изделий, укладку на плиты для сушки.

Дозирование массы для формования производится либо на автоматических весах с последующей укладкой массы в пресс-форму, либо объемным методом одновременно с укладкой. Первый способ обеспечивает большую точность, второй — более производителен. Объемное дозирование применяется для изделий массой не более 5 кг. Способ засыпки формовочной массы в полость пресс-формы зависит от метода дозирования, размеров и формы изделия, состава абразивной массы. При формовании небольших изделий дозирование и укладка (разравнивание) шихты совмещаются в одну операцию (рис. 31). Из питателя масса поступает в полость пресс-формы. Излишки массы снимаются при обратном ходе питателя.

Для засыпки формовочных масс при изготовлении кругов диаметром более 250 мм применяют специальные укладчики с разравнивателями массы в пресс-форме. В этом случае подаваемая в пресс-форму масса равномерно распределяется вращающимися спиральными ножами, лезвия которых выполнены так, что одно из них прилегает к оправке, а второе — к внутренней поверхности наружного кольца пресс-формы. Для дозирования и укладки крупнозернистой абразивной массы в пресс-формы при изготовлении кругов простой формы, например ПП, может быть применен сжатый воздух (рис. 32). Опыт применения такого способа укладки показал его преимущество перед известными: улучшаются условия труда, точность дозирования, уменьшается неуравновешенность кругов. Так как мелкозернистые абразивные массы менее подвижны, чем крупнозернистые, одновременно с укладкой и разравниванием их производят рыхление непосредственно в пресс-форме. Рыхление способствует получению однородного по плотности брикета.

Уплотнение абразивной формовочной массы в пресс-формах выполняют на гидравлических прессах и специальных формовочных агрегатах. Скорость прессования 0,3—3 см/с. Начальная стадия прессования ведется при больших, а заключительная при меньших скоростях. При прессовании мелкозернистых масс брикет выдерживают под давлением в течение нескольких секунд. Давление прес-

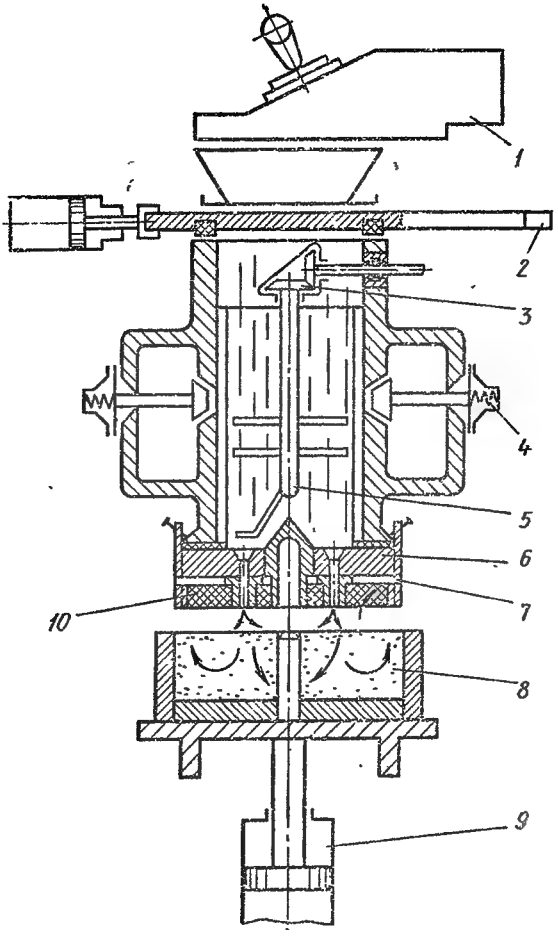


Рис. 32. Схема дозировки, укладки абразивной масс в пресс-форму сжатым во духом:

1 — вибропитатель; *2* — шибе *3* — привод ворошителя; *4* выпускной клапан; *5* — вор шитель; *6*— приставка; *7* — р гулирующая гайка; *8* — прес форма; *9*—подъемный цилиндр *10* — керамическая плита

сования зависит от со става прессуемой смес и требуемой плотност и может быть принят примерно 250 кгс/см². При прессовании мелко зернистых масс давл ние несколько больше чем при прессовани крупнозернистых. П известному давлению площади формуемого из делия требуемая сил прессования

$$P = \frac{pF}{1000} \text{ т},$$

где p — давление прессо вания в кгс/см²;
F — площадь формо вания в см².

Как было показан выше, при прессовани абразивных масс плот ность брикета по высоте распределяется неравномерно. Для вы равнивания плотности применяют: прессование с допрессовкой в пресс-формах с подкладными кольцами или прокладками, прессо вание с гидроплитой, прессование заготовок с большой площадь с последующей разрезкой заготовки после сушки.

Прессование с допрессовкой широко используют при изготовле нии высоких кругов и выполняют в два этапа (рис. 33). Под обойм пресс-формы подкладывают прокладку и уплотняют массу пр давлении, равном примерно половине расчетного. Затем прокладки извлекают и окончательно прессуют круг. Во второй стадии уплот нение происходит в основном за счет перемещения нижнего пуансона, что обеспечивает более равномерное распределение плотности по высоте по сравнению с односторонним прессованием. Взамен про кладок могут быть использованы пружины, удерживающие от пере мещения обойму в начальный период прессования и сжимающиеся во второй. При использовании передвижных тележек, на которых

устанавливается пресс-форма вне зоны прессования применяют также специальные упоры, на которых вывешивают обойму до начала прессования. Эти упоры могут быть шариковыми и тогда на обойме выполняется специальная проточка.

Прессование с гидроплитой широко применяется в настоящее время на заводах при изготовлении крупногабаритных инструментов. Основным преимуществом гидроплит является то, что они способствуют получению равномерной плотности по площади изделия. Это обеспечивает после обжига получение изделий с равномерной твердостью, что особенно важно при прессовании кругов формы ПП диаметром 900—1400 мм. Формование с гидроплитой неизбежно приводит к некоторому увеличению припусков на механическую обработку по высоте, однако это оправдывается повышением качества инструмента.

Прессование пластин с последующей разрезкой их на заготовки применяют, например, при изготовлении брусков небольшого сечения. Поштучное прессование таких изделий не производят из-за трудности разравнивания шихты в узкой полости пресс-формы. Поэтому поштучное прессование заменяют прессованием пластины большего размера с последующей разрезкой ее на заготовки. Например, при изготовлении брусков длиной 150 мм прессуют круглые пластины диаметром 350—400 мм и после сушки разрезают бакелитовым кругом на прямоугольные бруски. При изготовлении тонких брусков может быть отформована пластина-заготовка двойной высоты, которая разрезается как по длине, так и по высоте.

Такую же технологию используют для формования тонких (менее 10—15 мм) кругов формы ПП диаметром до 350 мм. При формовании таких кругов из-за малой толщины слоя трудно разравнять шихту в пресс-форме по всей площади. Неравномерное разравнивание приводит к большому разбросу твердости. Поэтому формуют болванку двойной высоты, сушат и разрезают ее бакелитовым отрезным кругом из электрокорунда зернистостью 25—40 твердостью С2—СТ1. Недостатком описанной технологии является повышенный расход абразивной формовочной массы из-за большого количества отходов. Однако повышение качества инструмента и равномерности твердости оправдывает некоторое увеличение затрат на изготовление.

Полученные после прессования абразивной формовочной массы брикеты обладают малой (0,3—0,8 кгс/см^2) прочностью на изгиб, поэтому извлекать брикеты из пресс-форм и перекладывать на плиты для сушки нужно очень осторожно. Для транспортировки свежеотформованных изделий используются специальные поддоны, вакуум-

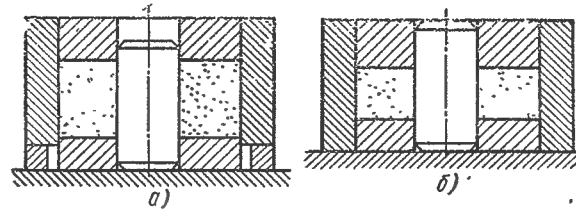


Рис. 33. Последовательность прессования круга формы ПП с допрессовкой:

а — прессование верхним пуансоном до упора; *б* — допрессовка нижним пуансоном после извлечения прокладок

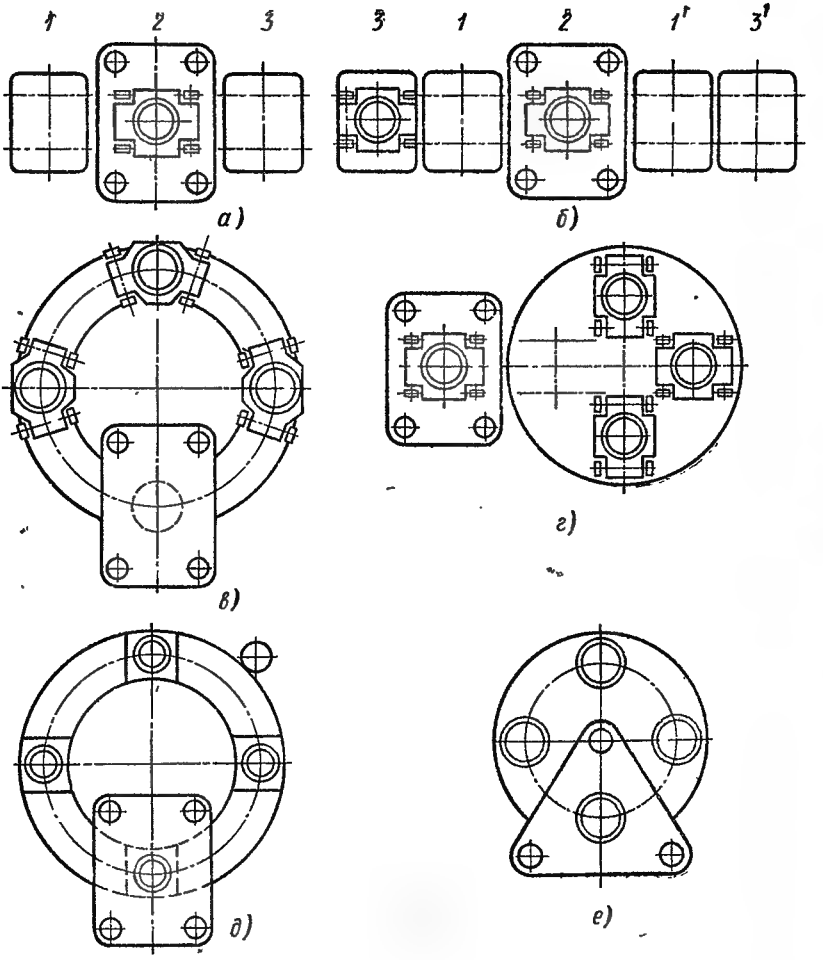


Рис. 34. Схемы механизации прессов:

а — линейная однокомплектная; *б* — линейная двухкомплектная; *в* — с кольцевым конвейером и ручным перемещением тележек; *г* — с приставным поворотным столом; *д* — с кольцевым конвейером и механизированным движением пресс-форм; *е* — автоматический агрегат с трехколонным прессом и четырехпозиционным поворотным столом

ные присосы, пневмосъемники в виде надувного кольца, которое охватывает круг по периферии плиты. Крупногабаритные изделия перемещаются с использованием механизированных транспортных средств на подкладочных плитах, которые закладываются перед прессованием в пресс-форму.

На рис. 34 приводятся схемы механизации прессования абразивных инструментов. На позиции *1* (рис. 34, *а*) производят подготовку пресс-формы, дозирование массы и укладку ее, на позиции *2* — прессование, на позиции *3* — выталкивание и съем изделий. Аналогичное

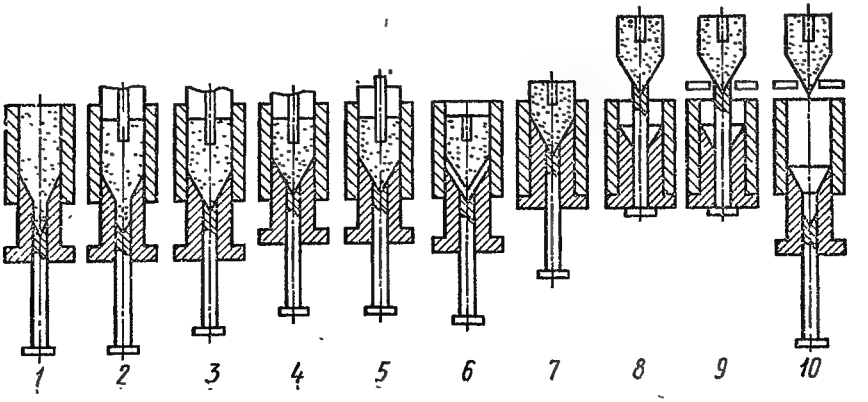
расположение оборудования при использовании двух тележек показано на рис. 34, *б*. Остальные схемы предусматривают использование кольцевых конвейеров для транспортировки пресс-форм на тележках (рис. 34, *в*), на вращающемся столе (рис. 34, *г*), в закрепленном состоянии на кольце (рис. 34, *д*), на четырехпозиционном поворотном столе (рис. 34, *е*). Анализ затрат времени показывает, что при формовании небольших партий изделий рационально использовать схему, показанную на рис. 34, *а*, при больших партиях — на рис. 34, *е*. При серийном производстве инструмента для формования применяют автоматические агрегаты АФА-3, АФА-4 и другие, на которых выполняется полный цикл формования от дозирования массы до укладки брикета на плиты для сушки.

Прессование на формовочных агрегатах и автоматических линиях обеспечивает изготовление в час до 50 кругов диаметром 400—600 мм или 800—1200 кругов диаметром 50—80 мм. На формовочных агрегатах выполняют все операции от весового или объемного дозирования массы до укладки готового изделия на плиту для сушки. Массу в пресс-формах разравнивают вращающимися спиральными ножами, и прессуют до заданной высоты или по давлению, определяемому электроконтактным манометром.

Особую сложность преставляет формование инструментов малых размеров с различной высотой сечения в направлении прессования. На рис. 35 показана в качестве примера последовательность формования головок формы ГК. Для того чтобы обеспечить равномерную плотность заготовки, применяют двустороннее прессование. Первоначально головка прессуется верхним (рис. 35, поз. *1*, *2*) пуансоном, а затем подпрессовывается нижним (поз. *3*, *4*). После выталкавания из пресс-формы (рис. 35, поз. *5*—*10*) головка переносится на плиту для сушки.

Автоматические формовочные линии объединяют в одну технологическую линию машины по приготовлению абразивной формовочной массы и формованию изделий, что обеспечивает высокую производительность труда. После формования для обеспечения равно-

Рис. 35. Схема формования головок



мерного распределения влаги в кругах изделия выдерживают на воздухе в течение 12—48 ч.

Термическая обработка. Прочность брикета абразивного инструмента значительно увеличивается после термической обработки в результате физических, химических и структурных изменений, происходящих в керамических отформованных телах при нагреве. Процесс термической обработки брикетов разделяется на два этапа: сушку и обжиг. Во время сушки удаляется несвязанная вода, затвердевает клеющий увлажнитель и изделие приобретает прочность, достаточную для укладки в стопки на вагонетки, на которых производится обжиг изделий. Обжиг придает изделию окончательные физико-механические свойства. Процессы сушки и обжига могут быть объединены в одну технологическую операцию. Однако на большинстве заводов эти операции разделены, так как объединение требует сложной реконструкции печного оборудования.

Сушка происходит в печных установках камерного или туннельного типа. Изделия нагревают до температуры 90—120° С и выдерживают при этой температуре до тех пор, пока не удалится влага, содержащаяся в связке и клеящем веществе. Применяют радиационный и конвекционный способы нагрева. Радиационный нагрев изделий ведется путем облучения инфракрасными лучами, конвекционный — горячим воздухом или газом. Преимущественно используется конвекционный метод сушки. Изделия для сушки устанавливают на стальные или алюминиевые плиты, имеющие ребра или отверстия, и продвигают в печь. В процессе нагрева со скоростью 5—10° С/ч происходит интенсивное испарение влаги с поверхности изделия. За счет диффузии этот процесс распространяется и на внутренние слои. По мере высыхания влаги клеящее вещество и входящая в состав связки глина цементируют зерна абразива и других компонентов, что способствует повышению прочности изделия. Полное удаление влаги нежелательно, так как пересушенные изделия имеют низкую прочность и склонны к растрескиванию. Количество остаточной влаги, обеспечивающее оптимальные свойства брикета, должно быть 0,4—0,6%. Сушку крупнозернистых изделий заканчивают выдержкой при температуре 120° С. Время сушки зависит от размера кругов и составляет 2—30 ч (для кругов диаметром 300—1100 мм). Мелкозернистые изделия сушат при температуре 90° С. Время сушки при этом несколько больше. После сушки изделия охлаждают в печи до температуры 60—70° С, а затем на воздухе до комнатной температуры.

Контроль качества изделий после сушки производится внешним осмотром или приборами. При контроле отбраковывают изделия повышенной влажности с трещинами, сколами, деформациями и другими дефектами, которые не могут быть удалены механической обработкой. Если круги при простукивании издают глухой стук, их сушат вторично.

Высушенные изделия хранят перед обжигом не более 1—2 суток. При длительном хранении возможно поглощение влаги из воздуха,

что приводит к короблению, образованию трещин и появлению дефектов при обжиге.

Обжиг абразивных инструментов на керамической связке является операцией, завершающей процесс образования прочного керамического тела с равномерно распределенными во всем объеме и прочно удерживаемыми зернами абразива. Обжиг производится в пламенных туннельных или электрических щелевых печах при температуре 1250—1350° С. Электрические печи обеспечивают высокую точность поддержания теплового режима и применяются при изготовлении брусков из мелкозернистых масс, кругов для скоростного шлифования, кругов класса А и других высококачественных инструментов. Изделия для обжига продвигают в туннельную печь на вагонетках, футерованных шамотным кирпичом и карборундовыми плитами. Канал печи снабжен песочным затвором, изолирующим подвижную часть вагонеток от воздействия высоких температур. По мере продвижения изделий по каналу туннельной или щелевой печи происходит нагрев их до температуры обжига 1250—1270° С. Если не считать незначительного оплавления зерен электрокорунда при взаимодействии со связкой, то абразивные частицы в процессе нагрева изделия не претерпевают никаких изменений.

По мере нагрева при температуре выше 100° С из брикета удаляются остатки химически несвязанной воды. При последующем подъеме температуры начинается удаление из глины и силикатного стекла связанной воды. Если в качестве клеящей добавки использовался декстрин, то при нагреве выше 200° С он плавится, при температуре 400° С коксуется и выгорает при последующем повышении температуры. При температуре 700° С и выше начинаются процессы размягчения и плавления легкоплавких компонентов, входящих в состав глины, жидкого стекла и др. В результате сплавления компонентов связки, образования твердых растворов, диффузии и других химических и физических процессов образуется стеклообразное вещество — керамическая связка. Образующийся материал частично растворяет поверхность абразивных зерен и прочно соединяется с ними. Во время обжига происходят сложные физико-химические процессы, связанные с изменением химического состава и агрегатного состояния вещества связки. Эти процессы сопровождаются усадкой брикета, газовыделением, изменением прочности и других свойств.

Так как керамические материалы малотеплопроводны, то прогрев их и сопутствующие процессы по всему объему изделия происходят неравномерно. При этом возможно образование трещин, коробления изделий и других дефектов. Для обеспечения равномерного прогрева изделия устанавливают на вагонетках в определенном порядке. Круги простых форм, например ПП, устанавливают в стопки. Высота стопки определяется прочностью изделий после размягчения связки и зависит от толщины и диаметра кругов. Круги *3* (рис. 36, *а*) укладывают на керамические плиты *1*, собранные на огнеупорных колонках *2*. На рис. 36, *б* и *в* показана установка кругов ПП для спекания с пересыпкой огнеупором и на прокладках.

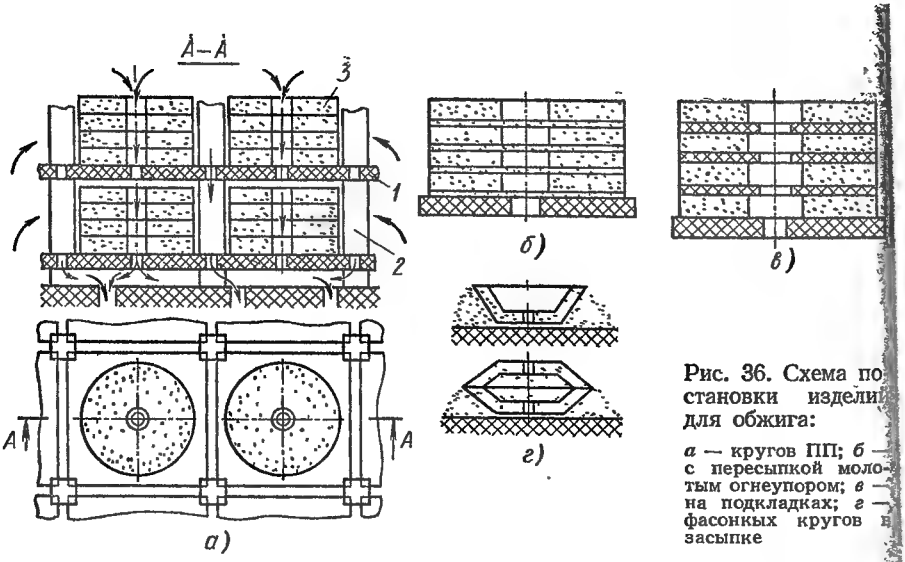


Рис. 36. Схема установки изделий для обжига:

а — кругов ПП; *б* — с пересыпкой молотым огнеупором; *в* — на подкладках; *г* — фасонных кругов в засыпке

В качестве прокладок могут быть использованы ранее обожженные круги.

Круги диаметром 300 мм и толщиной до 25 мм устанавливают в стопки по 4 круга, при большей толщине—по 5—8 штук. В стопку устанавливают круги с одинаковыми геометрическими размерами. Сверху на круги формы ПП и цилиндрические болванки для кругов 2П, 3П, ПВ, ПВД, окончательную форму которым придают при механической обработке, устанавливают фасонные круги ЧЦ, ЧК и бруски. В некоторых случаях круги после установки засыпают кварцевым крупным песком с размером частиц 500—800 мкм (рис. 36, *г*). Засыпка предотвращает коробление инструмента при нагреве. На обжиг загружают раздельно круги из электрокорунда и зеленого карбида кремния. При загрузке следует следить, чтобы края изделий не свисали с прокладок.

Загруженная изделиями вагонетка протакливается через туннельную печь гидравлическими толкателями. В качестве топлива в печах используется газ. Печи оборудуются необходимыми контрольными и авторегулирующими устройствами, обеспечивающими поддержание стабильной температуры и состава газовой среды. Весь туннель делится на три зоны: подогрева, выдержки и охлаждения. В первых двух происходит нагрев и изотермическая выдержка изделий. Скорость подъема температуры должна быть строго ограничена, так как во время нагрева происходит удаление влаги и выгорание связующего вещества, что требует определенного времени. В интервале температур 600—900° С обжигаемое изделие имеет малую прочность. В этом интервале начинается размягчение компонентов связки и термические напряжения, возникающие из-за неравномерного нагрева, могут вызвать появление трещин от растягивающих напряжений в центре изделия. Чтобы предотвратить это, нагрев производят медленно со скоростью не более 50—80° С/ч.

После полного размягчения компонентов связки изделие становится малочувствительным к термическим напряжениям. Скорость нагрева может быть в этом интервале увеличена. При температуре обжига производят изотермическую выдержку. Время изотермической выдержки составляет несколько часов. Температура регулируется так, чтобы отклонение было не более ±10° С по всей длине зоны выдержки.

На качество обжига влияет атмосфера спекания. В пламенных печах преимущественно стремятся к созданию окислительной атмосферы, чтобы в газах, обогревающих изделие, содержалось 6—10% кислорода. Восстановительная атмосфера в печи, например, при обжиге изделий из карбида кремния может привести к появлению на поверхности изделия черных пятен из-за неполного удаления углерода, образующегося при разложении карбида кремния на составные элементы. В восстановительной среде рекомендуется обжигать инструмент только на керамических связках, содержащих окислы бора.

Охлаждение кругов после обжига может быть разделено на три этапа. При 800—1350° С изделия обладают повышенной пластичностью и скорость охлаждения может быть большой — до 100° С/ч. По мере остывания изделия и потери пластических свойств скорость изменения температуры должна быть снижена до 60° С/ч, так как из-за низкой теплопроводности периферия и центр охлаждаются неравномерно и возникают значительные термические напряжения, которые могут привести к образованию трещин на периферии. После того как изделия остыли до 150—200° С, охлаждение может производиться с любой скоростью. В зону охлаждения вентиляторами подается холодный воздух. За счет тепла, накопленного изделиями, воздух нагревается. Нагретый воздух по специальному каналу подается в установки для сушки кругов. Утилизация тепла повышает экономические показатели процесса обжига. Остывшие изделия снимают с вагонеток и передают на механическую обработку.

Брак, обнаруженный после обжига, как правило, неустраним. Наиболее часто встречающиеся виды брака — несоответствие твердости, деформация и трещины на поверхности инструмента. Твердость может быть завышенной или заниженной из-за отклонения состава формовочной массы и пористости брикета от заданных. Завышение температуры и времени обжига приводит к завышению твердости, а обжиг при пониженной температуре — к снижению. Тщательный пооперационный контроль обжига может существенно снизить количество брака из-за несоответствия твердости.

Трещины на периферийной и внутренней частях кругов возникают при нагреве и охлаждении из-за термических напряжений. Растягивающие напряжения, к которым наиболее чувствительны керамические изделия, на периферии круга возникают при охлаждении, а в центре — при нагреве. При образовании трещин на периферии изделий следует скорректировать режим охлаждения, в центре — режим нагрева. Сквозные диаметральные трещины объясняются несоответствием скорости охлаждения на последней стадии

обжига, например, ускоренным охлаждением при температуре выш 250° С. Чтобы избежать деформации кругов при обжиге, следу контролировать состояние подкладочных плит, не завышать высот стопки изделий и не выгружать изделия из печи при повышенной те пературе.

Механическая обработка абразивных изделий может произв диться после сушки и после обжига. Однако в основном механиче кая обработка производится после обжига, что обусловлено невоз можностью получения точных геометрических форм и размеров кру гов при прессовании и обжиге в свободном состоянии; наличие на поверхности изделия «корочки» — слоя, состав и твердост которого значительно отличаются от заданного; необходимость балансировки крупных изделий, а в связи с этим удалением неурав новешенных масс.

Инструменты на керамической связке обрабатывают на токарных плоскошлифовальных, торцешлифовальных, сверлильных и други станках с применением несвязанного чугунного и абразивного зерна конических резцов из инструментальной стали, шлифовальны крупнозернистых абразивных кругов и алмазных инструментов По технологическому признаку различают обработку плоских, на ружных, внутренних и фасонных поверхностей.

Обработка плоских поверхностей керами ческих абразивных инструментов может производиться: дробью и отбеленного чугуна на плоскообдирочных станках; обтачиванием на токарных станках с применением стальных конусов и звездочек; шлифованием на токарных и плоскошлифовальных станках с при менением абразивных кругов или сегментов КЧ 80 СМ2—С1 на ба келитовой и керамической связках; алмазными инструментами.

При обработке чугунным зерном и обтачивании конусами и звез дочками разрушение хрупкого керамического тела происходит из-з действия значительных местных сжимающих сил и появления вслед ствие этого трещин в поверхностном слое с последующим его разру шением (рис. 37). Материал снимается как путем раскалывания от дельных зерен, так и вырыва их из связки.

Обработка торцовых плоскостей инструментов чугунным зерно широко распространена на абразивных заводах (рис. 38). Для обта чивания круг *1* устанавливают необработанной поверхностью на полотно *2* и прижимают к нему вращающейся шайбой. Полотно вра щается с частотой примерно 20 об/мин, и на поверхность его непре рывно элеватором подсыпается чугунное зерно *3*. Размер чугунного зерна выбирается в зависимости от зернистости обрабатываемых изделий: чем меньше зернистость абразива, тем меньше зернистость чугунного зерна. Обрабатываемый круг прижимается к рабочему полотну вращающейся от индивидуального привода с частотой 11— 20 об/мин шайбой. После обработки одной стороны круг переворачи вают и операцию повторяют. Отработанное зерно скатывается с по лотна и подымается элеватором в бункер, откуда непрерывно по лот кам подается снова на плоскость полотна. Для обеспечения равно мерного износа чугунной шайбы диаметр обрабатываемого круга

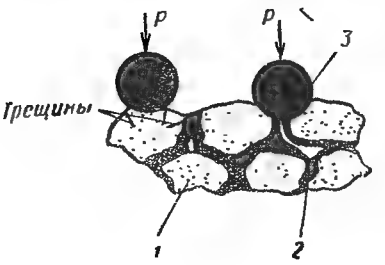


Рис. 37. Схема обработки абразивных кругов чугунным зерном:

1 — абразивное зерно; *2* — связка; *3* — чугунное зерно

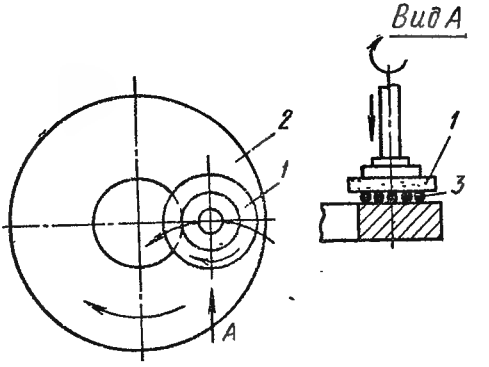


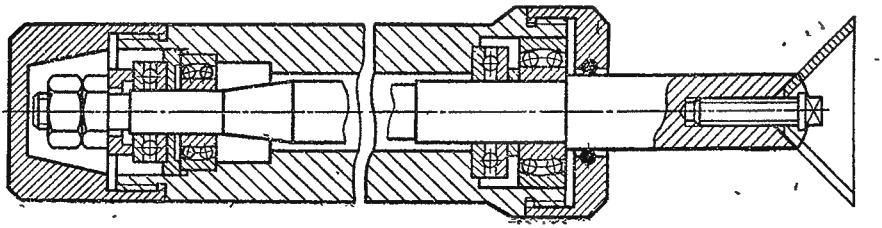
Рис. 38. Схема обработки торцов на плоскообдирочном станке

должен быть больше ширины шайбы. Поэтому при обработке изделий малого диаметра их загружают по нескольку штук в обойму. Высоту обрабатываемого круга контролируют по индикатору.

Производительность обработки плоскостей свободным зерном высокая. Двухшпиндельный плосокообдирочный автомат АПО 600 имеет проектную производительность 60 шт/ч при обработке кругов ПП диаметром 300 мм. Время обработки существенно зависит от характеристики обрабатываемого изделия. В общем случае крупнозернистые абразивные изделия обрабатываются быстрее мелкозернистых, мягкие — быстрее твердых, инструменты из зеленого карбида кремния — быстрее, чем из электрокорунда.

Токарная обработка плоскостей крупных изделий ведется на токарно-лобовых станках, в патроне которых зажато обрабатываемое изделие, а в суппорте — шлифовальная головка или свободно вращающийся шпиндель с закрепленным на нем конусом (рис. 39). Схематически обработка кругов конусом представлена на рис. 40. При резании конусом происходит обкатка со скольжением (проскальзывание до 10%), и конус постепенно изнашивается. Конусный резец, изготовленный из инструментальной стали У8—У10 и закаленный до высокой твердости, имеет большую режущую поверхность, в результате мало изнашивается и обеспечивает высокую точность обработки. Режимы резания при обработке стальными конусами: окружная скорость изделия 10—12 м/с; скорость переме-

Рис. 39. Конусная оправка для обработки абразивных кругов



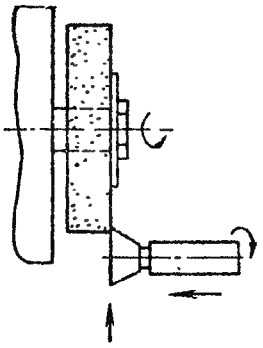


Рис. 40. Схема обработки наружной поверхности кругов формы ПП на токарном станке

щения суппорта 0,2—2,5 м/мин; глубина резания 0,2—0,5 мм. Торцы обтачивают от периферии к центру, не доходя до отверстия на 5—10 мм, а оставшиеся 5—10 мм обрабатывают от центра к периферии. Такой порядок обработки обеспечивает отсутствие сколов. После обработки круг зачищают бакелитовым сегментом. Обработка конусом применяется для образования выточек на кругах, например формы ПВ.

Алмазная обработка плоскостей абразивных инструментов аналогична операциям правки. Для обработки, например, торцов шлифовальных кругов для шлифования шариков подшипников могут быть применены бруски, режущие элементы которых изготовлены из славутича. При правке кругов этими брусками достигается высокая параллельность плоскостей инструмента, которая удовлетворяет требованиям, предъявляемым к инструменту класса А.

Обработка цилиндрических поверхностей абразивных инструментов производится точением, шлифованием, алмазным обтачиванием и сверлением.

Наружную поверхность цилиндрических кругов диаметром 500—1100 мм обрабатывают на станках МК-287. В качестве инструмента используют конусы и звездочки. При обтачивании конусом возможны сколы при обработке края изделия. Тонкие круги обрабатывают шарошечными звездочками или шлифованием. Так как разрушение поверхности при использовании звездочек производится большим количеством острых выступов, то опасность образования сколов меньше и шероховатость обработанной поверхности выше по сравнению с обработкой конусами.

Шлифование цилиндрической поверхности кругов прямой формы диаметром 250—600 мм на станках ХШ-155 и ХШ-156 с вертикальным расположением шпинделя производят кругами из черного карбида кремния зернистостью 80 на керамической связке, для меньших зернистостей — на бакелитовой. При этом получают точные размеры и низкую шероховатость поверхности.

Для обработки цилиндрических поверхностей могут быть также использованы алмазные инструменты: правящие ролики и резцы. В этом случае круг устанавливают в рабочее положение; поверхностный слой удаляют при линейной скорости на периферии 25—30 м/с. Такая обработка обеспечивает максимальную точность изделий. Заданная точность посадочного отверстия, диаметр которого меньше заданного, может быть обеспечена растачиванием и зенкерованием. Если отверстие больше, то его заливают специальным составом. Отверстия диаметром до 100 мм растачивают с применением чугунного зерна и сверл специальной формы (рис. 41). Точность отверстий, полученных при обработке, невысока. Значитель-

ное повышение точности достигается при использовании алмазных зенкеров. Зенкер представляет собой цилиндр с заборным конусом. На поверхности цилиндра закреплены в металлической связке зерна алмазов. Твердость алмазных зерен значительно выше, чем абразивных, поэтому алмазным зенкером можно обрабатывать поверхность посадочного отверстия абразивных кругов в размер.

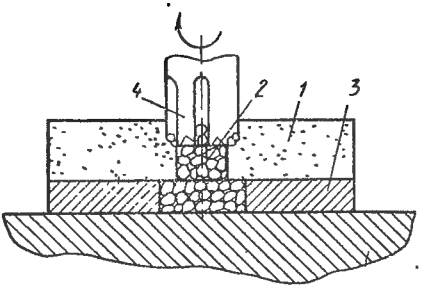


Рис. 41. Схема обработки посадочного отверстия с использованием чугунного зерна:

1 — обрабатываемый круг; *2* — чугункое зерно; *3* — подкладка; *4* — сверло

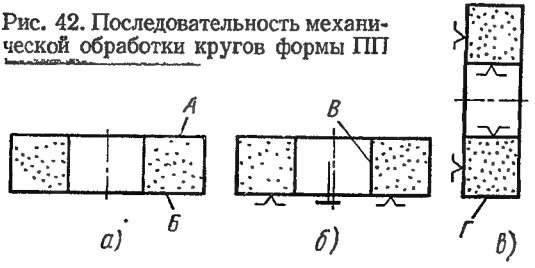
Алмазные инструменты применяются для обработки фасонных поверхностей. Например, Волжским филиалом ВНИИАШа разработана технология обработки выточек в кругах формы ПВ. Алмазная расточная головка состоит из трех фрез с приводом. Фрезы оснащены природными алмазами, закрепленными в металлической связке. При обработке кругов одновременно производится съем материала как по торцу, так и по периферии выточки, что обеспечивает высокую точность обработки.

Для получения высокой точности посадочного отверстия без механической обработки его калибруют специальной массой, прочно сцепляющейся с материалом абразивного круга. В этом случае размер отверстия в заготовке делают большим. Затем в отверстие устанавливают калибровочный стержень и в зазор между ними и стенками отверстия заливают быстротвердеющую массу. После извлечения стержня получают калиброванное отверстие.

Обработка фасонных поверхностей абразивных кругов формы 1Т, 2Т, 3Т и выточки кругов формы ПВ и ПВД производится на токарных станках КТ-41 и МК-287 шлифовальными кругами или конусами. Заготовки этих кругов формуют в виде плоских дисков и после обжига обрабатывают. Для обтачивания кругов могут быть применены также алмазные резцы.

Чтобы обеспечить заданную точность инструмента, порядок операций механической обработки должен быть строго определенным. При изготовлении кругов формы ПП операции выполняются в следующей последовательности. Первоначально обрабатывают на плоскообдирочных станках базовые поверхности *А* и *Б* и этим обеспечивают параллельность торцов (рис. 42, *а*). Базируясь на одну из обработанных поверхностей, растачивают или заливают массой посадочное отверстие и обеспечивают перпендикулярность

Рис. 42. Последовательность механической обработки кругов формы ПП



образующих цилиндрической поверхности *В* плоскостям *А* и *Б* (рис. 42, *б*). Круги набирают в пакет на оправке и протачивают (или шлифуют) по поверхности *Г* (рис. 42, *в*). При этом обеспечивается концентричность поверхностей *Г* и *В*. В большинстве случаев абразивные круги после установки на шпиндель шлифовального станка подвергают правке алмазными инструментами для выведения биения, вскрытия зерен, что следует учитывать при механической обработке.

Контроль качества и упаковка — завершающие операции изготовления керамических инструментов. Маркировка кругов производится вручную или на маркировочных машинах. Содержание маркировки, обозначения марки абразивных материалов и связок оговорены ГОСТ 4785—64. Для маркировки вручную используют трафареты. Маркировка на станках выполняется резиновыми валиками. Состав краски для маркировки может быть, например, таким: 60% глицерина, 20% ультрамарина, 20% сажи. Цвет маркировки зависит от цвета круга.

Качество изделий контролируют по следующим параметрам: точность геометрических форм и размеров, твердость, величина дисбаланса, прочность. Круги, имеющие дисбаланс выше допустимого, подвергают повторному контролю по геометрическим размерам. Несоблюдение размеров может вызвать повышенный дисбаланс и повторную механическую обработку и балансировку. Если величина дисбаланса не превышает предельной, то круг подвергают вырубке и заливке свинцом. Методы контроля других параметров предусмотрены соответствующими ГОСТами и описаны выше.

Упаковка кругов производится следующим образом: круги и инструменты небольшого размера упаковывают в коробки, пакеты или в деревянные бочки с пересыпкой стружкой, большие (диаметром свыше 600 мм) — в индивидуальные деревянные ящики. Большие круги можно транспортировать в контейнерах.

Изготовление инструмента на бакелитовой связке

На бакелитовой связке изготовляют различные шлифовальные и отрезные круги, сегменты, головки и специальный инструмент. Из-за хорошей самозатачиваемости, высокой прочности и упругости инструмент применяют для обдирочных и черновых работ, а также при чистовом и доводочном шлифовании.

Абразивное зерно инструмента на бакелитовой связке закреплено в связке, в состав которой входит связующее и наполнитель (рис. 43). В качестве связующего используют фенолформальдегидные смолы, которые при нагреве затвердевают и приобретают высокую прочность. Наличие непрочных, легко выкрашивающихся в процессе обработки частиц наполнителя улучшает работоспособность кругов, так как на поверхности при выпадании частиц наполнителя образуются поры, что облегчает удаление продуктов, образующихся при шлифовании.

При изготовлении инструмента на бакелитовой связке не требуется высокотемпературное печное оборудование. Термическая об-

работка выполняется в свободном состоянии или в пресс-форме при температуре до 200° С. Простота и доступность процесса позволяют изготовлять нормализованные инструменты на специальных участках или в абразивных цехах крупных машиностроительных заводов.

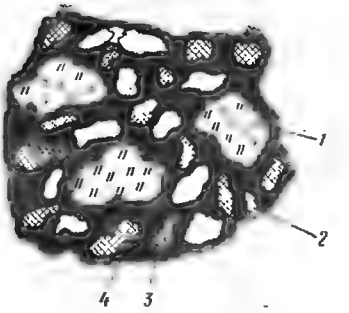


Рис. 43. Строение абразивного круга на бакелитовой связке:
1 — абразивное зерно; *2* — поры; *3* — зерна наполнители; *4* — связка

При серийном производстве термическая обработка инструмента выполняется в свободном состоянии после формования. Технология изготовления инструмента в этом случае включает следующие основные операции: приготовление абразивной формовочной массы, формование, бакелизацию (термическую обработку), механическую обработку, контроль качества. Инструменты на бакелитовой связке могут быть изготовлены также с использованием технологии горячего прессования. При этом точность формы и размеров изделия может быть выше, чем при свободной термической обработке.

Рецептуры связок и применяемые материалы берутся в зависимости от требуемых свойств. Например, состав абразивной массы для кругов средней твердости из электрокорунда (в весовых частях) может быть таким: абразивное зерно 100, связующее ПБ 7,56, жидкий бакелит 2,92, алебастр 1,71. Количество абразивного зерна в инструменте определяется так же, как и на керамической связке, заданной структурой, а количество связки — требуемой твердостью. Для крупнозернистых бакелитовых изделий существует определенное соотношение между количеством пор и твердостью. Ориентировочно может быть принято, что для кругов твердостью М3 количество пор должно быть не более 39% объема, для каждой следующей степени — на 3% меньше. Меняя пористость (плотность), можно при одном и том же составе получать инструмент различной твердости. При изготовлении инструмента на бакелитовой связке используются следующие материалы.

Связующее ПБ (ГОСТ 3552—63) — светло-желтый порошок, состоящий из смеси новолачной смолы с отвердителем — уротропином. Количество уротропина составляет 6—10% от массы смолы. При нагреве связующее проходит стадии размягчения в интервале 50—100° С и отверждения после 140° С. После отверждения при температуре 180° С бакелит приобретает высокую прочность (до 2000 кгс/см^2 при сжатии) и стойкость к растворению в воде и органических веществах. Плотность связующего — 1,25 г/см^3. При длительном хранении связующее ПБ поглощает из воздуха влагу и комкуется, что приводит к образованию раковин и вздутий при термической обработке инструмента. Поэтому связующее должно храниться в сухом помещении в закрытой таре.

Жидкий бакелит (ГОСТ 4559—49) используют для увлажнения абразивных масс на связующем ПБ. Наличие небольшого количе-

ства жидкого бакелита, склеивающего частицы шихты, предотвращает комкование и расслаивание компонентов абразивной смеси при транспортировке и засыпке в пресс-форму. Жидкий бакелит — смола коричнево-бурого цвета с плотностью 1,1—1,15 г/см³ с содержанием свободного фенола от 7 до 15%. При повышении температуры жидкий бакелит при нагреве в результате сложных химических реакций отвердевает. Из-за удаления растворителя при нагреве жидкий бакелит теряет до 20% массы.

Алебастр применяется в качестве наполнителя. Химическая формула алебастра $CaSO_4 \cdot 5H_2O$, химический состав: 32,56% CaO, 46,5% SO_3, 20,94% — H_2O, плотность 2,2—2,4 г/см³. Тонкость помола алебастра при изготовлении абразивного инструмента должна быть такой, чтобы размер частиц был не более 0,15 мм. При изготовлении кругов для обдирочного шлифования в качестве наполнителя используется криолит $AlF_3 \cdot 3NaF$ марок К1 и К2.

Приготовление формовочной массы. Бакелитовые формовочные массы смешивают в лопастных смесительных машинах. Абразивное зерно, порошок связующего ПБ и наполнитель дозируют объемным или весовым методом, жидкий бакелит — объемным. В работающий смеситель засыпают абразивное зерно, добавляют жидкий бакелит, затем через небольшой интервал времени — наполнитель и перемешивают до образования равномерной массы. После этого засыпают связующее ПБ и окончательно смешивают все компоненты. Время смешивания составляет 10—20 мин в зависимости от номера зернистости абразивного порошка. Чем мельче порошок, тем больше время смешивания. Затем смесь протирают через проволочную сетку с крупными (1,4—2,5 мм) ячейками. Приготовленная масса должна обладать удовлетворительной сыпучестью при высокой степени равномерности распределения компонентов по всему объему без наличия комков шихты.

Формование бакелитовых масс производят путем холодного или горячего прессования и прокаткой на вальцах. При холодном прессовании основными операциями являются: укладка массы в пресс-формы, прессование, разборка пресс-форм и извлечение брикета. Инструмент после прессования подвергают термической обработке при повышенной температуре. Для укладки массы в пресс-формы, разравнивания и рыхления используют те же приемы и оборудование, что и при формовании инструмента на керамической связке. Большое внимание уделяется равномерности распределения массы в полости пресс-формы. Формующие поверхности пресс-форм перед загрузкой шихты смазывают машинным маслом. Это уменьшает усилия прессования и неравномерность плотности, облегчает извлечение изделий после прессования. Инструменты на бакелитовой связке формуют на гидравлических прессах в пресс-формах, предусматривающих прессование «до упора». При холодном прессовании расчетное давление составляет 200—250 кгс/см². Бакелитовые круги и сегменты формуют также на автоматических формовочных агрегатах.

Горячее прессование массы в закрытых пресс-формах с давлением до 500 кгс/см² при температуре 180±10° С осуществляют на гидра-

влических прессах, оборудованных подогревными плитами. При горячем прессовании совмещаются процессы формования и термической обработки, которые выполняются в пресс-форме. Деформация изделий при этом минимальна. При горячем прессовании получают высокую плотность и прочность инструмента. Высокая прочность бакелитовых кругов по отношению к ударным нагрузкам делает их пригодными для скоростного шлифования со скоростями более 40 м/с. Чтобы предотвратить разрыв круга от центробежных сил, в его корпус закладывают упрочняющее стальное кольцо или армирующую сетку из проволоки. В этом случае навеска абразивной массы делится на две части. После засыпки и разравнивания первой части в пресс-форму укладывают кольцо и засыпают вторую часть навески. Затем смесь спрессовывают.

Прокатка бакелитовой формовочной смеси на вальцах применяется для получения тонких пластин, из которых вырезают затем заготовки отрезных кругов. В этом случае в качестве связующего используют порошкообразный бакелит. Смесь увлажняют жидким бакелитом и в подогретом состоянии прокатывают на тщательно отшлифованных валках. Заготовки вырубают до остывания пласта, остатки массы после вырубки перетирают и используют вторично.

Бакелизация (термическая обработка) инструмента на бакелитовой связке предназначена для придания брикету высокой прочности и водостойкости. Она ведется в высокопроизводительных электрических печах — туннельных бакелизаторах и заключается в нагреве изделий по особому режиму до температуры 170—200° С и выдержке при этой температуре в течение нескольких часов. При нагреве происходит отверждение бакелита, приводящее к повышению вязкости связки. Одновременно выделяются летучие вещества: пар, свободный фенол и другие продукты.

Изучение свойств абразивных масс в процессе термической обработки показало, что свежезаформованные брикеты обладают высокой вязкостью, которая при нагреве снижается и становится минимальной при температуре 115—130° С. В этом интервале температур изделия имеют высокую пластичность и весьма малую прочность и легко деформируются даже под собственным весом. При температуре 150° С вязкость и прочность брикета возрастают из-за отверждения фенольной смолы. Поэтому в процессе термической обработки изделия можно быстро нагревать до температуры 100° С. В интервале температур до 130° С быстрый нагрев недопустим. После достижения температуры 150° С скорость нагрева можно снова увеличить.

Обычно бакелизация производится в неконтролируемой среде в электробакелизаторах непрерывного действия. Бакелизатор — низкотемпературная многозонная электрическая туннельная печь. Стены и перекрытия печи выложены огнеупорным кирпичом, а каркас и наружная обшивка выполнены из металла. В потолке бакелизатора предусмотрены углубления для нагревательных элементов. В каждой зоне установлены вентиляторы для перемешивания горячего воздуха. Для термической обработки изделия устанавливают

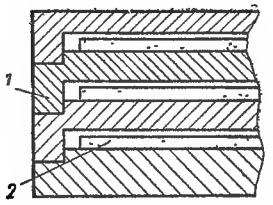


Рис. 44. Схема постановки бакелитовых отрезных кругов в упрощенных прессформах для термической обработки:

1 — алюминиевые плиты; *2* — отрезной круг

на полки специальных вагонеток и проталкивают в камеру предварительного подогрева электробакелизатора. Камера имеет две двери — наружную и внутреннюю. Во время прогрева изделий обе двери закрыты и в камеру подается горячий воздух. Воздух подогревается теплом, отбираемым от изделий, находящихся в задней камере охлаждения. Эта камера также имеет две двери. Камеры подогрева и охлаждения соединены трубопроводами для подачи воздуха. По окончании подогрева наружная дверь задней камеры открывается и вагонетка с охлажденными изделиями выводится из бакелизатора. Затем наружная дверь камеры охлаждения закрывается, открываются внутренние двери обеих камер и проталкиваются все вагонетки. В результате освобождается входная камера, куда после закрытия внутренних дверей подают через переднюю открытую очередную вагонетку. В средней зоне бакелизатора производится медленный равномерный прогрев бакелизируемых изделий до температуры 195° С с выдержкой при этой температуре.

Изделия для бакелизации устанавливают так, чтобы обеспечить активную циркуляцию нагретого воздуха вокруг каждого изделия и равномерный прогрев по всему объему. Наиболее простым и производительным является способ открытой установки изделий, широко применяемый на заводах, производящих абразивный инструмент, на металлические дырчатые или ребристые плиты. Однако при открытой установке инструмента испарение смолы из поверхностных слоев приводит к ухудшению качества и неравномерности его износа. Способ установки изделий на термическую обработку в засыпке из кварцевого песка уменьшает испарение связующего из поверхностных слоев. Однако при этом усложняется технологический процесс и увеличивается цикл нагрева и охлаждения, снижается коэффициент использования объема печи.

Для изготовления качественных инструментов используют термическую обработку в металлических упрощенных формах (рис. 44). При этом способе несколько усложняется оснастка, но повышается качество инструмента. Формы могут быть тонкостенными и изготовляться из алюминия или другого легкообрабатываемого металла. Степень бакелизации (поликонденсации бакелита) определяет качество абразивного инструмента. Недобакелизированная связка прочно удерживает зерна абразива, однако из-за ее упругости снижается шлифующая способность. Перебакелизированные круги обладают низкой стойкостью из-за снижения прочности связующего. В производственных условиях степень бакелизации определяют по цвету: светло-коричневый и коричневый цвет свидетельствуют о нормальной степени бакелизации, темный — о перебакелизации. Более точно о степени бакелизации можно судить, измеряя твердость кругов на приборе Роквелла (шкала В) или на пескоструйном

приборе. Так, при проверке на приборе Роквелла недобакелизированные и перебакелизированные круги имеют меньшую твердость по сравнению с нормально забакелизированными. После бакелизации изделия передают на механическую обработку.

Механическая обработка бакелитовых инструментов производится на том же оборудовании и теми же методами, что и инструментов на керамической связке. Припуски, оставляемые для механической обработки инструментов на бакелитовой связке, меньше, чем на керамической. Преимущественно применяют обработку свободным чугунным зерном и шлифованием абразивными кругами. Не требуют механической обработки инструменты на бакелитовой связке, изготовленные горячим прессованием.

После механической обработки производят контроль твердости, прочности, дисбаланса, геометрических форм и размеров инструмента; маркируют инструмент и упаковывают для отправки потребителю.

Изготовление инструмента на вулканитовой связке

Вулканитовая связка — многокомпонентная смесь каучука и других органических и неорганических веществ, образующих в процессе формования и термической обработки прочную гибкую или жесткую основу, в которой закреплены абразивные зерна. Инструмент на вулканитовой связке отличается повышенной стойкостью профиля и прочностью по отношению к ударным нагрузкам по сравнению с керамической и бакелитовой связками, обеспечивает более высокий класс шероховатости обработки. Широко используются круги на вулканитовой связке для резьбошлифования, чистовых и отделочных операций шлифования стальных деталей. Отрезные круги на вулканитовой связке толщиной 0,6—6 мм применяются при резании конструкционных, инструментальных и жаропрочных сталей.

Технология изготовления вулканитовых кругов включает следующие основные операции: приготовление абразивных формовочных масс, формование изделий, термическую обработку (вулканизацию), механическую обработку и контроль качества.

Применяемые материалы. Основным компонентом вулканитовой связки является синтетический каучук, который в присутствии серы при нагреве изменяет свою структуру, вулканизируется и приобретает заданные твердость и прочность. В состав смесей для изготовления вулканитовых инструментов вводят также наполнители для повышения механической прочности, ускорители процесса вулканизации и мягчители.

Применяют в основном синтетические каучуки различных марок: натрий-бутадиеновый, бутадиен-нитрильный, бутадиен-стирольный. Показатели прочности этих каучуков значительно ниже, чем у природного, но из-за большой дефицитности природные каучуки для вулканитовых связок не применяются.

Синтетический каучук — упругая масса от светло-желтого до темно-коричневого цвета. Бутадиен-нитрильные и бутадиен-сти-

рольные каучуки используются преимущественно для изготовления жестких эбонитовых связок, а натрий-бутадиеновый — для мягких. При нагреве каучука в присутствии серы он полимеризуется. Линейные молекулы каучука соединяются за счет ненасыщенных атомов углерода и образуют сетчатую пространственную структуру. При этом происходят химические реакции с серой и количество несвязанной серы в составе массы уменьшается. В результате резко возрастает прочность каучука с 4 до 40 кгс/см² у невулканизированного и с 80 до 300 кгс/см² у вулканизированного. Одновременно уменьшается величина удлинения при разрыве, увеличивается твердость и теплостойкость. Этот процесс называется вулканизацией. Во время вулканизации выделяется значительное количество тепла, что должно быть учтено при разработке технологического процесса.

Сера — вулканизирующий агент для многих марок каучука. Для приготовления вулканитовых абразивных масс применяют техническую молотую серу высшего и первого сорта класса А (ГОСТ 127—64). Качественные показатели технической серы: температура плавления около 120° С, содержание серы 99,9%, количество золы не более 0,05%, влажность не более 0,5%, остаток при просеивании на сите 0071 (ГОСТ 3584—53) не более 4%.

В зависимости от количества серы, введенной в состав вулканитовых масс, получают различную твердость, пластичность и прочность связки. Если количество серы, введенной в состав связки, не превышает 15%, то продукт вулканизации имеет низкую твердость и высокую пластичность. Такие составы применяются при изготовлении гибких инструментов. При содержании серы 20—60% получают после вулканизации твердый и прочный материал — эбонит.

Для сокращения времени вулканизации и улучшения качества получаемого материала в состав связки вводят ускорители. В качестве ускорителей преимущественно используют органические вещества в виде порошков: каптакс (ГОСТ 739—41), альтакс (ГОСТ 7087—54) и тиурам (ГОСТ 740—41). Ускорители вводятся в состав связки в небольшом количестве 0,5—3%.

Для повышения прочности завулканизированного каучука в его состав вводят наполнители — мелкодисперсные порошки сажи, окиси цинка, криолит и др. Эти вещества повышают сопротивление разрыву и твердость изготовленных на вулканитовой связке абразивных изделий. Количество наполнителя должно быть не больше так называемого предела наполнения, превышение которого приводит к снижению прочности связки. Наиболее заметное влияние оказывают наполнители на прочность гибких (резиновых) связок. В этом случае введение наполнителя повышает прочность связки с 10—40 до 150—300 кгс/см². Выбор марки и оптимального содержания наполнителя производят опытным путем.

В качестве наполнителей каучуковых масс применяют жженую магнезию (окись магния) ГОСТ 844—73 и цинковые белила (окись цинка) марки М-1 и М-2 (ГОСТ 202—62) — белые, мелкодисперсные порошки с плотностью 5,6 и 3,1 г/см³ соответственно.

Окиси магния и цинка могут быть использованы как наполнители в резине и эбоните. Менее универсальными являются применяемые для наполнения резин различные виды сажи по ГОСТ 7885—68 и некоторые другие материалы, например окись железа, криолит, белая сажа.

Для облегчения смешивания каучука с порошкообразными компонентами, повышения прочности сцепления абразивного зерна со связкой, снижения твердости кругов в состав вулканитовых абразивных формовочных масс вводят мягчители. В качестве мягчителей используют продукты перегонки нефти, например рубракс, жирные кислоты — стеарин, синтетические вещества — дибутилфталат, полидиены, идитол и др. Дибутилфталат представляет собой маслянистую прозрачную желтоватую жидкость с плотностью более 1,045 г/см^3. Полидиены — жидкости, имеющие цвет от желтого до вишнево-красного. Плотность полидиена 0,9—0,95 г/см^3, содержание влаги не более 0,2%. Идитол — искусственная смола желтого цвета в виде кусков неправильной формы. При температуре 90° С смола разжижается; легко растворяется в этиловом спирте. Так как введение мягчителей влияет после вулканизации на твердость и другие характеристики материала, их оптимальное количество должно быть определено опытным путем.

Рецептуры вулканитовых масс. Вулканитовые круги преимущественно применяют для чистовой обработки изделий. Абразивные зерна в этом случае закрепляются в связке, обладающей повышенной по сравнению с керамической и бакелитовой связками податливостью и прочно удерживаются в ней. При повышении сил, воздействующих на зерно, связка деформируется и зерно как бы утопает. Это уменьшает объем снимаемой стружки и способствует получению высокого класса шероховатости поверхности. Обновление режущих кромок зерен, находящихся на рабочей поверхности инструментов на вулканитовой связке, происходит медленно. По-видимому, с этим связано кажущееся полирующее действие вулканитовой связки по сравнению с керамической, жестко удерживающей абразивные зерна. Для обеспечения достаточно высокой производительности обработки при изготовлении инструмента на вулканитовой связке количество абразива берется на 10—20% больше по сравнению с инструментом на керамической и бакелитовой связках. Состав связки и соотношение ее количества и абразива определяются требуемой твердостью, упругостью, теплостойкостью и другими свойствами. Следует отметить, что по сравнению с керамической связкой круги на вулканитовой гораздо плотнее Пористость их составляет около 10%, тогда как в керамических кругах пористость достигает 30—40%. Вследствие этого количество связки в вулканитовых кругах значительно больше, чем в керамических.

Составы вулканитовых связок, как правило, многокомпонентны. Так как основным составляющим является каучук, то расчет рецептуры ведется на 100 весовых частей его. Твердость кругов регулируется не количеством связки, как при изготовлении керамических и бакелитовых инструментов, а изменением состава. Например,

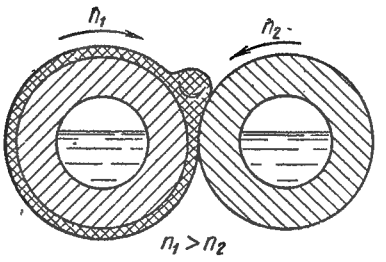


Рис. 45. Схема смешивания каучукосодержащих масс на каландровых вальцах

твердость повышается при увеличении количества серы, наполнителя и уменьшается при увеличении количества мягчителей. Для изготовления жестких инструментов количество серы должно быть не ниже 20 весовых частей. Рецептура для изготовления гибких инструментов включает до 15 весовых частей серы. В первом случае после вулканизации получают жесткий материал — эбонит, во втором — эластичную резину. Жесткие вулканитовые связки содержат, как правило, на 100 весовых частей каучука 20—60 частей серы, до 30 частей мягчителя, до 20—50 частей наполнителя, 0,5—3 части ускорителя. Гибкие связки включают до 15 частей серы, до 10 частей мягчителя, до 100 частей искусственных смол, до 50 частей наполнителя и 0,3—0,5 части ускорителя.

Искусственные смолы вводят в состав гибких связок для повышения прочности закрепления абразивного зерна в связке. Обработка зерна может быть выполнена фенолформальдегидными смолами, например жидким бакелитом. Эта смола хорошо смачивает поверхность абразивных зерен и вместе с тем прочно соединяется во время вулканизации с каучуком.

Приготовление формовочной массы. В приготовленной для формования массе все материалы должны быть распределены так, чтобы в самом малом объеме содержались компоненты в заданном рецептурой соотношений. Как и для других связок, при изготовлении инструмента на вулканитовой связке принята технология, при которой предварительно готовят связку, а затем смешивают ее с абразивным порошком для получения формовочной массы. В состав вулканитовой формовочной абразивной массы в отличие от керамической и бакелитовой входят материалы разной консистенции: порошки — абразивное зерно, наполнители, ускорители вулканизации, сера; жидкости — бакелит, мягчители; эластичный и упругий каучук.

Многокомпонентные вулканитовые связки смешивают на резиносмесительных вальцах. Смешивание заключается в многократном пропускании массы в зазор между валками, вращающимися с различной частотой вращения (рис. 45). В зоне, предшествующей входу массы в зазор, из-за различной окружной скорости поверхностей валков компоненты активно перемешиваются и материалы шихты связки равномерно распределяются по всему объему. В состав абразивной массы входит большое количество различных порошков. Для простоты приготовления формовочной массы эти порошки смешиваются в заданном соотношении предварительно. Это уменьшает время смешивания на вальцах. Для смешивания порошки дозируют с высокой точностью и засыпают в барабанный смеситель. Время вращения барабана составляет не менее 40 мин. Готовая смесь

порошкообразных компонентов используется затем по мере необходимости для смешивания с каучуком.

Для приготовления вулканитовой связки навеску каучука вводят в зазор между вращающимися валками смесительных вальцев. Чтобы смесь не прилипала к валкам, их поверхность тщательно шлифуют. Валки должны быть подогреты до температуры 50° С. Зазор между валками должен быть в пределах 0,5—2 мм. В течение нескольких минут каучук в виде тонкой ленты распределяется по поверхности переднего валка. Избыточное количество каучука собирается перед входом в зазор в виде вращающегося жгута. Затем в зазор между валками засыпают небольшими порциями половину порошкообразных компонентов и в течение 2—3 мин происходит равномерное распределение их по объему связки. После этого увеличивают зазор между валками и вводят вторую половину порошкообразных компонентов. Чтобы обеспечить качественное смешивание, связку периодически срезают с валка и снова вводят в зазор.

При изготовлении абразивных кругов твердостью С и СМ на вулканитовой связке в соответствии с рецептурой предусматривается введение в состав массы мягчителей. Смешивание каучука с мягчителями производится до засыпки порошкообразных компонентов. Общее время цикла приготовления связки до 20 мин. Приготовленная масса связки должна храниться не более 3 суток. При более длительном хранении происходит частичная вулканизация что снижает качество инструмента.

Абразивную формовочную массу получают смешиванием связки с абразивным зерном. Шлифзерно предварительно обрабатывают бакелитом для получения сцепления с резиной. На 200 кг зерна, загружаемого в обогреваемую чашу смесителя, заливают 4 кг жидкого бакелита и смешивают массу 40—45 мин. После выгрузки зерно охлаждают на воздухе. Обработанное зерно не должно храниться на воздухе более 5 суток, так как при длительном хранении жидкий бакелит теряет свои свойства. Абразивное зерно и связку смешивают в такой последовательности. Устанавливают между валками зазор 5—10 мм. При меньшем зазоре возрастает сила, действующая на массу, что приводит к дроблению абразивного зерна. Требуемое количество связки вводят в зазор между валками. После непродолжительного вращения связка равномерно охватывает один из валков. Излишки связки собираются в виде вращающегося жгута при входе в зону перемешивания. Это количество связки называется запасом.

Абразивное зерно делится на две равные части и вводится поочередно в зазор между подогретыми валками на вращающийся запас связки. Весь цикл смешивания длится до 20 мин. При переходе на смешивание масс другой зернистости валки и вальцы тщательно очищают. Тонкозернистые массы (абразивные порошки № 8 и мельче) смешивают на отдельных вальцах. Приготовленная масса хранится не более 3 суток в закрытой таре. Перед использованием масса разогревается до 10 мин на вальцах.

Формование. Для формования заготовок применяют, в зависимости от размеров кругов, следующие методы: для кругов формы ПП

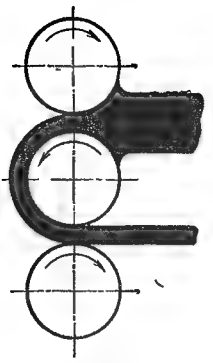


Рис. 46. Схема каландрирования вулканитовой абразивной массы

высотой 6—13 мм — прокатку на вальцах (листование) в размер по высоте с последующей вырубкой заготовки требуемого диаметра; для кругов формы ПП высотой 32—200 мм — прокатку (листование), вырубку нескольких заготовок, сборку их в пресс-форме и спрессовывание под давлением (дублирование) до слипания отдельных пластин в одно целое; для тонких прорезных кругов высотой 0,6—6 мм — прокатку на вальцах (листование) до высоты 6 мм, калибровку или каландрирование в размер по высоте, вырубку заготовки (рис. 46). Отформованные и вырубленные заготовки припудривают тальком (чтобы они не слипались). При формовании заготовки необходимо следить, чтобы прокатываемый лист был однородным по цвету, плотности, имел глянцевую поверхность. Нельзя допускать засорения листа абразивными массами других характеристик, маслами, мазутными пятнами и другими посторонними включениями. Чтобы лист не прилипал во время формования к поверхности валков, они тщательно шлифуются и подогреваются горячей водой или паром. Отформованная заготовка при длительном хранении изменяет свои размеры. Поэтому не позднее 24 ч со времени формования изделия должны быть переданы на вулканизацию.

Вулканизация. Для вулканизации используют специальные электрические низкотемпературные печи, называемые вулканизаторами. Вулканизатор разделен на семь зон, в каждой из которых поддерживается определенная температура: зона I — 70° С, II — 120° С, III — 140° С, IV — 150° С, V — 160° С, VI — 170° С. В зоне VII нагревателей нет. Изделия для вулканизации укладывают на вагонетки. По мере продвижения вагонетки через все зоны изделия нагреваются, что обеспечивает последовательное протекание процессов испарения низкотемпературных материалов (зона I), начало и протекание процесса вулканизации (зоны II—VI), охлаждение (зона VII).

Для начала вулканизации температура нагрева должна быть выше температуры плавления серы. После начала реакции вулканизации за счет выделяющегося в процессе взаимодействия серы и каучука тепла круг может существенно нагреваться. Это приводит к интенсивному выделению газов, деформации изделий, появлению трещин. Для предотвращения этих последствий в состав шихты вводят специальные вещества, снижающие скорость разогрева, или регулируют температуру нагрева. Точность поддержания температуры во многом определяет качество инструмента. Ввиду этого установки для вулканизации оборудуются устройствами для автоматического контроля температуры. Вулканизацию небольших партий изделий на вулканитовой связке можно выполнять также в автоклавах и между нагретыми плитами гидравлических прессов.

Окончательная обработка и контроль качества. На вулканитовой связке изготовляют ограниченную номенклатуру кругов простой

формы. Точность формы вулканитовых кругов после прокатки и вулканизации выше, чем после прессования и обжига керамических кругов, и поэтому припуски на механическую обработку могут быть меньше. При механической обработке в основном выполняют операции: рассверливание отверстия; обработку плоскостей, наружной поверхности и выточек.

Для обработки отверстий могут быть применены керамические резцы и алмазные зенкеры из природных алмазов зернистостью 120—150 штук на один карат. Алмазы закрепляют в металлической связке. Алмазные зенкеры обеспечивают более высокую точность обработки, чем керамические резцы.

Плоские и наружные поверхности кругов шлифуют крупнозернистыми шлифовальными кругами на бакелитовой связке средней твердости. Круги формы ПП высотой до 32 мм обрабатывают по наружной поверхности и посадочному отверстию диаметром 500—600 мм и высотой 32—200 мм — по всем поверхностям. Затем производят балансировку кругов и при необходимости для устранения дисбаланса повторяют более тщательно некоторые операции механической обработки. Все круги подвергают внешнему осмотру. Затем проверяют точность геометрических размеров. Проверка на прочность производится при вращении кругов на станке ЛТ-7 со скоростью, превышающей в 1,5 раза рабочую. Качественные круги маркируют специальными красками — черной или белой в зависимости от цвета круга. Черную краску готовят из смеси типографской краски с растворителем и лаком, белую — из алюминия в порошке, растворителя и лака. При необходимости может быть выполнена операция калибровки посадочного отверстия составом, приготавливаемым из смеси шлифпорошка с серой и нитроэмалью. Этот состав наносят на внутреннюю поверхность, а затем, пока масса не застыла, проталкивают через отверстие протертый керосином калибр, размеры которого соответствуют размеру посадочного отверстия. После затвердевания получают посадочное отверстие требуемого диаметра.

Изготовление шлифовальных шкурок

Шлифовальную шкурку изготовляют на бумажной и тканевой основе. На одной из сторон основы прочно закрепляют зерна абразивных материалов: электрокорунда, зеленого и черного карбида кремния, корунда, кремния и др. Бумажная основа недостаточно прочна и, как правило, используется для изготовления шкурок, работающих без охлаждения. Когда обработка производится с охлаждением, в качестве основы используют специальные сорта бумаги (влагостойкие) или ткани. Тканевую основу применяют также для изготовления шкурок, используемых при изготовлении бесконечных лент для ленточно-шлифовальных станков. Тканевая основа должна быть гибкой и прочной, мало удлиняться при натяжении. Наиболее широко применяются хлопчатобумажные ткани типа саржи, полудвунитки и др. Эти ткани дешевые, хорошо сцепляются с клеевой осно-

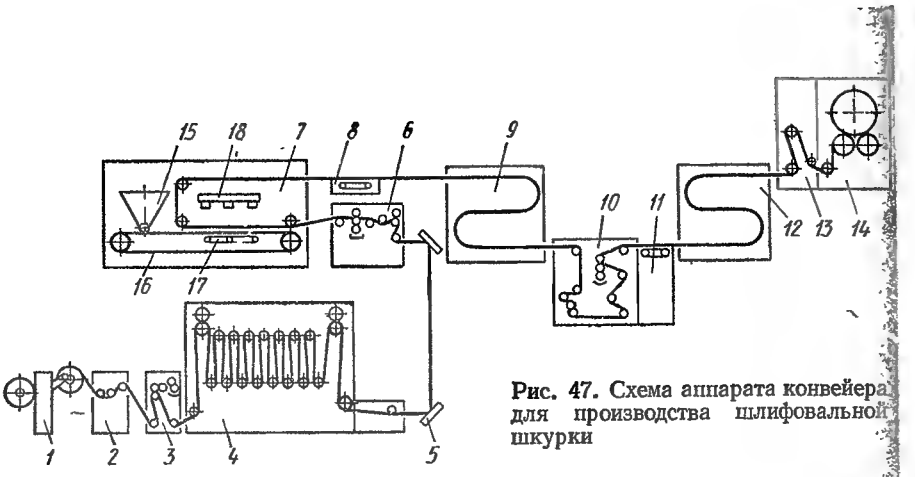


Рис. 47. Схема аппарата конвейера для производства шлифовальной шкурки

вой и имеют достаточно высокие показатели прочности на разрыв при низком удлинении. Для придания влагостойкости, повышения эластичности и прочности ткань пропитывают (аппретируют) специальным составом. Для этих целей могут быть использованы смеси на основе синтетических веществ, например, готовый латексный аппрет СКС 30, в состав которого входит каучук. Аппрет пропитывает ткань, закрывает поры и создает хорошие условия для нанесения и закрепления абразивных зерен клеем.

К клеящим веществам, удерживающим абразивные частицы на поверхности инструмента, предъявляются особые требования. Клей должен прочно соединяться с абразивными зернами и основой с образованием эластичного слоя, быть стойким к воздействию влаги, машинного масла, иметь низкую температуру сушки. Наиболее распространены мездровый клей для бумаги и обычных тканевых шкурок, клей на основе фенолформальдегидных смол и специальные лаки, а также другие природные и синтетические вещества.

Технологический процесс изготовления как бумажных, так и тканевых шкурок включает следующие этапы: подготовку основы, нанесение на одну сторону клея, насыпку и прикрепление зерен, закрепление зерен вторым слоем клея, сматывание ленты в рулон или разрезку на отдельные листы и полосы. При производстве тканевой основы для влагостойких шкурок ткань аппретируют вначале на специальной конвейерной установке. Первоначально наносят слой аппрета и сушат его в камере при температуре 110—130° С. После затвердевания слоя ткань проглаживают (каландрируют), прокатывая ее между двумя валками. Эта операция необходима для выравнивания слоя аппрета и улучшения сцепления его с основой. Затем производят операцию вулканизации аппрета при температуре 160° С. В результате аппретирования получают эластичную тканевую основу толщиной до 1 мм, равномерно покрытую с одной стороны тонкой пленкой аппрета.

Одна из возможных схем нанесения зерна на основу показана на рис. 47. Рулон аппретированной ткани разматывается на размоточном станке *1* и, проходя аппарат *2*, поступает на маркировочный

станок *3*. На этом станке печатается наименование или обозначение завода-изготовителя, марка материала основы, характеристики абразивного зерна, номер партии и дата изготовления. Пройдя компенсатор *4* и направляющие *5*, ткань поступает на валы клеенаносящей машины *6*. Клей наносится на аппретированную ткань валиком, вращающимся в клеевой ванне. Количество нанесенного клея и толщина пленки его зависят от вязкости, скорости вращения валков и других факторов. После нанесения клея ткань проходит через камеру *7*, в которой в электростатическом поле производится насыпка зерна на основу. Абразивное зерно из бункера *15* подается ровным слоем на ленту транспортера *16*. Лента с зерном протягивается в межэлектродном пространстве, образованном нижним *17* и верхним *18* электродами. Нижний электрод изготовлен в виде трубчатой рамки с закрепленными на ней нихромовыми проволочками. Верхний электрод представляет собой алюминиевый лист, к которому прижата перемещающаяся основа шкурки. При попадании зерен абразива в межэлектродное пространство они под действием электрического потенциала притягиваются к верхнему электроду и внедряются в слой клея. Во время перемещения зерно ориентируется так, что его острые режущие кромки выступают наружу из слоя клея: Регулируя разность потенциала (чем больше потенциал, тем интенсивнее притяжение), расстояние между электродами (с увеличением расстояния уменьшается притяжение), количество подаваемого на транспортер абразивного порошка и скорость перемещения транспортерной ленты и основы, добиваются равномерного расположения зерен при достаточной насыщенности поверхности шкурки зерном. После нанесения зерен тканевая основа через компенсатор *8* поступает в печь *9*, где при температуре 120° С клей затвердевает. После сушки на станке *10* наносят второй слой клея, закрепляющий абразивные зерна. Пройдя компенсатор *11* шкурку сушат в печи *12*. Затем шкурку увлажняют паром при температуре 40—50° С и на валиках *13* придают ей эластичность. После изготовления шкурку сматывают в рулон на машине *14*. Аналогичные операции выполняют при изготовлении других видов шкурок.

Глава V. АЛМАЗНЫЙ ИНСТРУМЕНТ

§ 1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ АЛМАЗНОГО АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

Алмазным абразивным называют инструмент, рабочая часть которого состоит из зерен алмазного порошка, закрепленных связкой. Инструмент изготовляют в основном из синтетических алмазных порошков и лишь незначительную часть (менее 10%) из природных. Алмазный абразивный инструмент, как правило, состоит из алмазоносного слоя, прочно соединенного с корпусом. Наличие корпуса является основным конструктивным признаком, отличающим его от инструмента из обычных абразивных материалов и дает возможность использовать алмазоносный слой до полного износа, тогда как в инструменте из обычных абразивов та его часть, которая зажата в оправке, не используется. Для закрепления инструмента на оправке или шпинделе станка в корпусе делают посадочное отверстие или предусматривают установочный хвостовик. Материал корпуса и метод его соединения с алмазоносным слоем выбирают в зависимости от марки связки алмазоносного слоя, формы, размеров и назначения инструмента. Без корпуса в настоящее время выпускаются только круги небольших размеров, например А1ПП.

Алмазоносный слой является рабочей частью инструмента, определяющей его работоспособность и срок службы. Он характеризуется маркой и зернистостью алмазного порошка, маркой связки, твердостью, структурой, формой и размерами.

В Советском Союзе выпускается широкая номенклатура стандартизированного алмазного абразивного инструмента разных форм и размеров, на различных связках. Однако во многих случаях возникает необходимость разработки новых инструментов, отличающихся от стандартных. При проектировании инструмента в первую очередь выбирается форма, размеры и вид рабочей поверхности, марка, зернистость и содержание (концентрация) алмазов, марка связки. Инструмент проектируется с учетом технологических особенностей производства. При создании новых видов инструмента в первую очередь необходимо провести технико-экономический анализ целесообразности их применения по сравнению со стандартными. Следует учитывать, что производство нового инструмента связано с дополнительными затратами на разработку технической документации и изготовление оснастки, что увеличивает его стоимость и удлиняет сроки внедрения. В тех случаях, когда установлена экономическая целесообразность применения нового инструмента, его проектирование осуществляют по схеме, показанной на рис. 48.

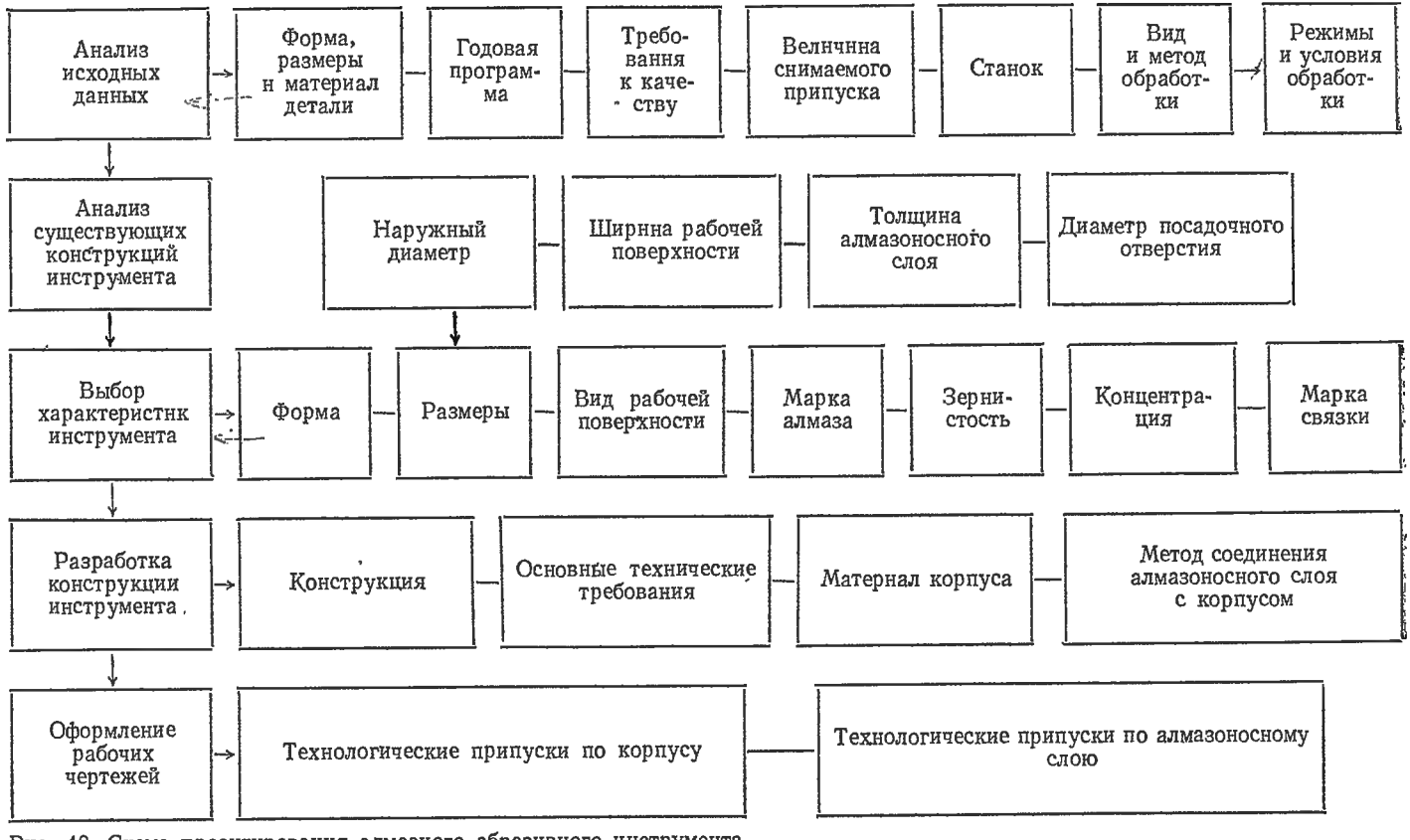


Рис. 48. Схема проектирования алмазного абразивного инструмента

Классификация инструмента

Шлифовальные круги. Кругами называют инструмент в виде тел вращения, состоящий, как правило, из корпуса и алмазоносного слоя. По форме, размерам и другим характеристикам алмазные шлифовальные круги имеют самую широкую номенклатуру по сравнению с другими группами инструмента. Для различных видов обработки используется большое количество (свыше 200) различных форм и размеров кругов. Однако основные потребности промышленности удовлетворяются ограниченной номенклатурой форм, которые стандартизованы. В нашей стране разработаны ГОСТы на 14 типовых форм шлифовальных кругов, основные размеры и области применения которых приведены в табл. 27. Эти круги с различными характеристиками алмазоносного слоя выпускаются специализированными заводами и составляют основной объем производства. По заказам могут быть спроектированы и изготовлены специальные формы кругов.

Шлифовальные головки. Головками называют инструмент, имеющий форму тела вращения и состоящий из рабочей части и цилиндрического хвостовика. Хвостовик служит для установки и закрепления головки в специальном патроне или шпинделе станка. Длина хвостовика, как правило, в несколько раз превышает наружный диаметр шлифовальной головки. Головки предназначены для шлифования отверстий и пазов небольших размеров. Формы рабочей поверхности головок весьма разнообразны и зависят в основном от формы обрабатываемой поверхности и метода обработки. В табл. 28 приведены стандартизованные формы шлифовальных головок, их обозначение и основные размеры.

Отрезные круги и пилы предназначены для резки изделий из твердого сплава, керамики, кварца, камней, природных строительных материалов и прорезки пазов. Различают следующие разновидности этого инструмента.

Отрезные круги (рис. 49) — инструмент, состоящий из корпуса в виде тонкого диска со сплошным алмазоносным слоем, расположенным по наружной кромке или кромке центрального отверстия. Круги выпускаются по ГОСТ 10110—71.

Отрезные сегментные круги (рис. 50) — разновидность отрезных кругов с наружной режущей кромкой и прерывистой рабочей поверхностью. Форма, размеры и основные требования к отрезным сегментным кругам оговорены ГОСТ 16115—70 и 16117—70.

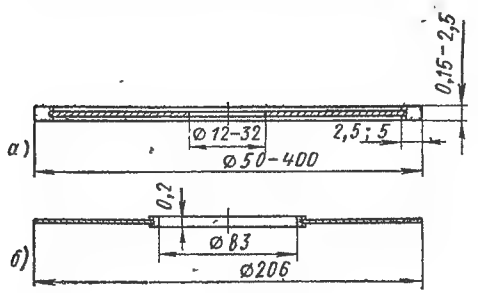
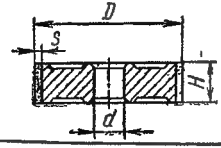
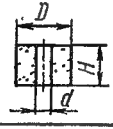
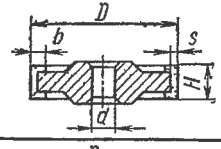
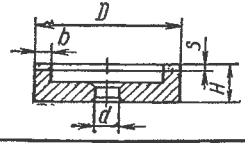
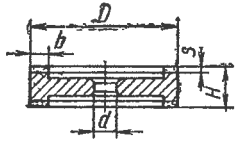


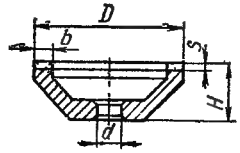
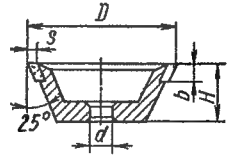
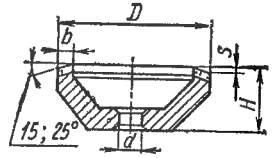
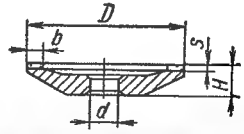
Рис. 49. Отрезные алмазные круги
а — с наружной режущей кромкой
б — с внутренней режущей кромкой

Таблица 27

Форма, основные размеры и назначение шлифовальных кругов (ГОСТ 16167-70—16180-70)

Наименование	Форма	Обозначение	Основные размеры в мм	Назначение
Плоские прямого профиля		АПП	$D = 16 \div 500$ $H = 2 \div 50$ $d = 5 \div 305$ $S = 2 \div 5$	Шлифование цилиндрических, конических и плоских поверхностей; заточка и доводка твердосплавного инструмента; бесцентровое шлифование набором кругов
То же, без корпуса		АП1П	$D = 6 \div 13$ $H = 6 \div 10$ $d = 2 \div 4$	Шлифование цилиндрических и конических отверстий
То же, трехсторонние		А2ПП	$D = 125 \div 250$ $H = 6 \div 20$ $d = 32 \div 127$ $b = 4 \div 12$ $S = 2 \div 4$	Обработка за одну установку цилиндрических поверхностей деталей и торцов выступов; обработка пазов и шлицев в твердосплавных штампах
Плоские с выточкой		АПВ	$D = 80 \div 300$ $H = 18{,}5 \div 32$ $d = 20 \div 127$ $b = 3 \div 60$ $S = 1{,}5 \div 5$	Заточка и доводка твердосплавных резцов, сверл, зенкеров и других инструментов; плоское шлифование стекла и других неметаллических материалов
Плоские с двусторонней выточкой		АПВД	$D = 100 \div 250$ $H = 6 \div 25$ $d = 20 \div 127$ $b = 3 \div 20$ $S = 1 \div 5$	Доводка твердосплавных измерительных скоб; заточка и доводка твердосплавного инструмента

Продолжение табл.

Наименование	Форма	Обозначение	Основные размеры в мм	Назначение
Чашечные конические		АЧК	$D = 50 \div 250$ $H = 20 \div 52$ $d = 16 \div 127$ $b = 2 \div 20$ $S = 1{,}5 \div 5$	Заточка и доводка многолезвийного инструмента с прямым зубом по задней поверхности, резцов, сверл и других инструментов; обработка плоских поверхностей
		А1ЧК	$D = 50 \div 150$ $H = 20 \div 40$ $d = 16 \div 51$ $b = 3 \div 10$ $S = 1{,}5 \div 3$	Заточка и доводка протяжек, разверток, пушечных сверл и других инструментов
		А2ЧК	$D = 50 \div 150$ $H = 20 \div 40$ $d = 16 \div 51$ $b = 3 \div 5$ $S = 3 \div 5$	Заточка и доводка многолезвийного инструмента со спиральным зубом по задней поверхности
Тарельчатые		АТ	$D = 50 \div 150$ $H = 6 \div 16$ $d = 16 \div 51$ $b = 1 \div 10$ $S = 1{,}5$	Заточка и доводка разверток, цельных и сборных фрез, дисковых пил, протяжек и других инструментов

Продолжение табл. 27

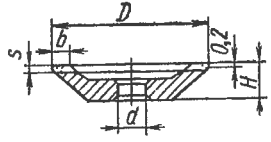
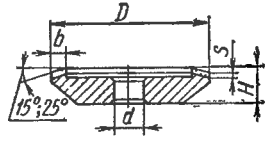
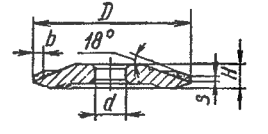
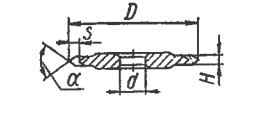
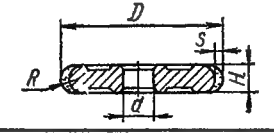
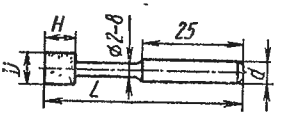
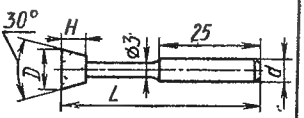
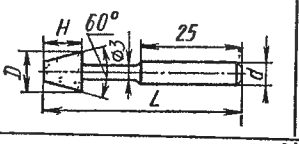
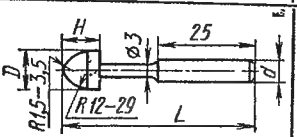
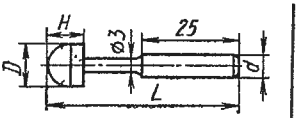
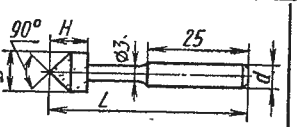
Наименование	Форма	Обозначение	Основные размеры в мм	Назначение
Тарельчатые		А1Т	$D = 50 \div 150$ $H = 6 \div 16$ $d = 16 \div 51$ $b = 1 \div 5$ $S = 1{,}5 \div 3$	Заточка и доводка многолезвийного инструмента по передней поверхности зубьев
		А3Т	$D = 32 \div 150$ $H = 5 \div 16$ $d = 10 \div 51$ $b = 1{,}5 \div 10$ $S = 1 \div 3$	Заточка и доводка многолезвийного инструмента по передней поверхности спиральных зубьев
		А4Т	$D = 125 \div 300$ $H = 13 \div 25$ $d = 32 \div 76$ $b = 4 \div 60$ $S = 2 \div 3$	Заточка и доводка червячных фрез
Плоские с двусторонним коническим профилем		А2П	$D = 25 \div 400$ $H = 3 \div 10$ $d = 6 \div 203$ $\alpha = 30 \div 120°$ $S = 2 \div 5$	Профильное шлифование, нарезание и шлифование наружных и внутренних резьб
Плоские с полукругловыпуклым профилем		АП5	$D = 50 \div 150$ $H = 2 \div 32$ $d = 16 \div 51$ $R = 1 \div 16$ $S = 2 \div 7$	Шлифование полукругловогнутых твердосплавных деревообрабатывающих фрез и других фасонных поверхностей, обработка канавок для схода стружки в резцах

Таблица 2

Форма и основные размеры алмазных шлифовальных головок

Наименование	Форма	Обозначение	Основные размеры в мм
Цилиндрические		АГЦ	$D = 3 \div 20$ $H = 3 \div 20$ $d = 3 \div 8$ $L = 40 \div 80$
Угловые		АГУ	$D = 6 \div 20$ $H = 3 \div 15$ $d = 3 \div 8$ $L = 40 \div 80$
Конические		АГК	$D = 6 \div 20$ $H = 6 \div 18$ $d = 3 \div 8$ $L = 40 \div 80$
Конические усеченные		А1ГК	$D = 6 \div 20$ $H = 4 \div 12$ $d = 3 \div 8$ $L = 40 \div 80$
Сводчатые		АГСв	$D = 6 \div 20$ $H = 9 \div 24$ $d = 3 \div 8$ $L = 60;\ 80$
Полушаровые		АГПш	$D = 6 \div 20$ $H = 6 \div 14$ $d = 3 \div 8$ $L = 40 \div 80$

Примечание. Связки кругов металлическая и органическая.

Полосовые пилы (рис. 51) — инструмент, состоящий из корпуса в форме полосы, на узкой стороне которой закреплены алмазные бруски.

Канатные пилы — инструмент, состоящий из конечного или бесконечного каната (троса), на котором закреплены алмазоносные элементы.

Цепные пилы — инструмент, у которого алмазоносный слой закреплен на звеньях цепи.

Характерной особенностью алмазных отрезных кругов и пил является незначительная ширина режущей части по сравнению

с остальными размерами. Это объясняется тем, что при резке различных материалов стремятся уменьшить ширину пропила с целью уменьшения энергоемкости процесса резания и экономии материала.

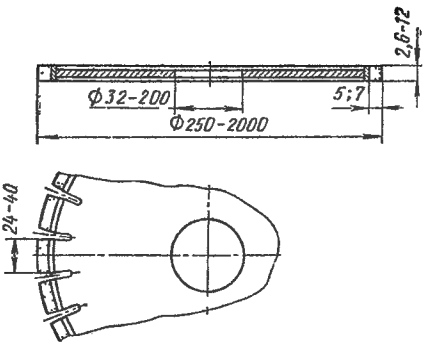


Рис. 50. Отрезной сегментный круг

Бруски имеют, как правило, форму удлиненного параллелепипеда, прямой или усеченной призмы, цилиндра, а также форму тела, образованного комбинацией плоских и фасонных поверхностей с прямолинейными образующими. На одной или нескольких поверхностях бруска нанесен алмазоносный слой. Бруски бывают ручные, хонинговальные и суперфинишные, надфили. Ручные бруски состоят из удобной ручки и закрепленного на ней алмазоносного слоя.

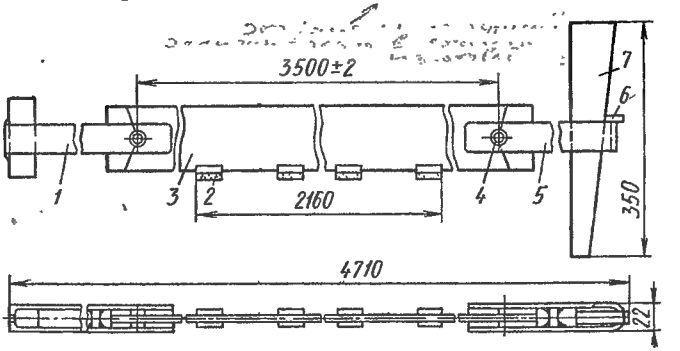


Рис. 51. Алмазная полосовая пила:

1 — левая тяга; *2* — алмазоносный брусок; *3* — полотно; *4* — палец; *5* — правая тяга; *6* — вкладыш; *7* — клии

Основные формы и размеры ручных брусков в соответствии с ГОСТ 16595—71 приведены в табл. 29. Хонинговальные и суперфинишные бруски (рис. 52) предназначены для машинной обработки внутренних и наружных цилиндрических поверхностей. Хонинговальные бруски имеют простую форму, широкую номенклатуру стандартных

Рис. 52. Основные формы брусков:

а, б — для хонингования и суперфиниширования отверстий; *в* — для суперфиниширования беговых дорожек колец подшипников; *г* — для суперфиниширования колец подшипников; *д, е* — для наружного хонингования и суперфиниширования

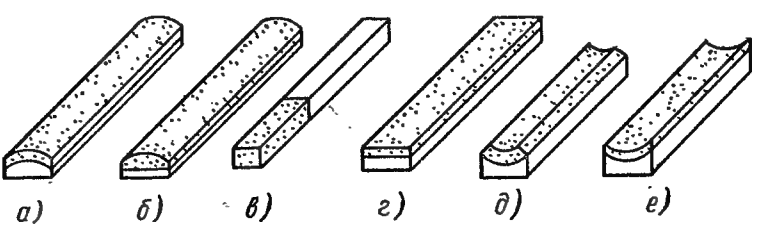
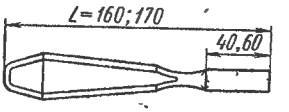
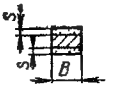
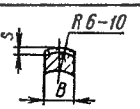
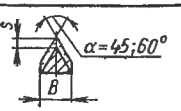
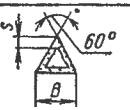
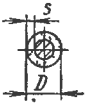


Таблица 25

Форма сечения и основные размеры ручных брусков



Наименование	Форма сечения	Обозначение	Основные размеры в мм		Связка
			B	S	
Плоские		АБП	6—10	1,5; 3	Органическая, металлическая и керамическая
Плоские двусторонние		АБД	8; 10	1,5; 3	
Радиусные		АБР	6—10	1,5; 3	Органическая и металлическая
Угловые		АБУ	6—10	3; 5	
Трехгранные		АБТ	10—15	2—4	
Круглые		АБК	$D = 6 \div 10$	1; 1,5	

(ГОСТ 16606—71) типоразмеров и самый большой среди брусков объем выпуска. Алмазные надфили отличаются тем, что их алмазоносный слой нанесен на державку (корпус) методом гальваностегии. Надфили предназначены для доводочных и лекальных работ, выполняемых как вручную, так и машинным способом. Существует сравнительно широкая номенклатура алмазных надфилей (рис. 53).

Сверла и зенковки — инструмент, предназначенный для получения сквозных и глухих отверстий. Алмазно-абразивными сверлами называют инструмент в виде цилиндрической (многогранной) трубы или стержня, на одном конце которого по торцу закреплен алмазоносный слой. Другой конец, являющийся хвостовиком, служит для установки и закрепления инструмента в шпинделе станка или переходной оправке. Различают кольцевые (керновые), сплошные (бескерновые) и ступенчатые сверла. Кольцевые сверла (рис. 54)

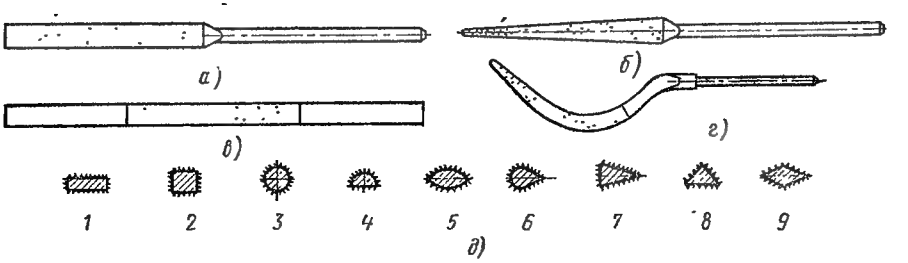


Рис. 53. Надфили для доводочных и лекальных работ:

а — тупоносый; *б* — остроносый; *в* — с двусторонней державкой; *г* — изогнутый; *д* — формы сечения рабочей части: *1* — прямоугольная; *2* — квадратная; *3* — круглая; *4* — полукруглая; *5* — овальная; *6* — комбинированная; *7* — ножовочная; *8* — трехгранная; *9* — ромбическая

предназначены в основном для сверления сквозных отверстий. Этими сверлами можно получить и глухие отверстия в изделиях из хрупких материалов, когда специальным инструментом может быть удален керн, образующийся в центральной части. Сплошные (бескерновые) сверла имеют сплошную или прерывистую рабочую поверхность по всему торцу. Ими можно удалять материал по всему сечению. Применяются они в основном для получения глухих отверстий.

Ступенчатые сверла предназначены для получения ступенчатых отверстий за одну операцию.

Зенковки предназначены для увеличения диаметра имеющихся отверстий и получения в отверстии конической или фасонной поверхности. Рабочий слой зенковок закрепляют со стороны одного из торцов. Форма его соответствует обрабатываемой поверхности.

Инструмент для зубохонингования (шевингования) служит для окончательной чистовой обработки закаленных зубчатых колес. Зубохонингование (шевингование) заключается в снятии заусенцев и небольшого слоя металла с боковых поверхностей зубьев абразивным инструментом, работающим по методу обкатки. Алмазный слой шеверов имеет форму зубчатого венца. Различают цилиндрические прямозубые (рис. 55), косозубые и другие шеверы.

Гибкий и эластичный инструмент предназначен для получения высокого класса шероховатости поверхности. К эластичному относят также инструмент, у которого алмазоносные элементы, изготовленные на жестких связках, закреплены в упругом (например, из полиэтилена) корпусе. В качестве примера такого инструмента

Рис. 54. Кольцевые алмазно-абразивные сверла

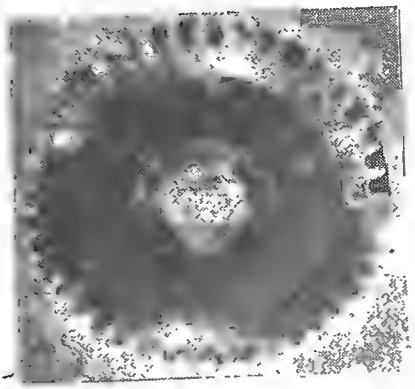


Рис. 55. Алмазный шевер

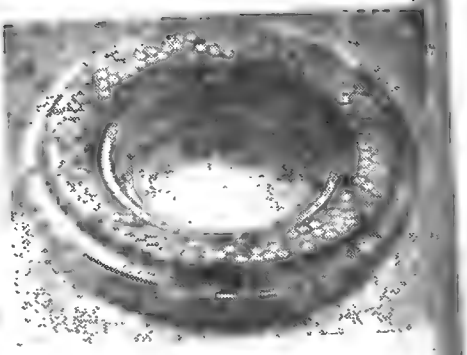


Рис. 56. Круг для обработки экранов кинескопов

на рис. 56 показан круг для обработки экранов кинескопов. Выпу скаются следующие виды эластичного инструмента:

а) эластичные круги — разновидность кругов, у которых алм зоносный слой изготовлен на эластичной связке и закреплен на эл стичном корпусе;

б) эластичные полировальные шкурки — инструмент с осново из эластичного материала, в котором закреплены зерна алмазног порошка: бесконечные ленты, ленты со свободными тканевыми кон цами (рис. 57) и эластичные диски (рис. 58); диски выпускаютс с центральным отверстием и без него;

в) гибкие алмазно-абразивные валы — разновидность эластич ных кругов, размер которых в осевом направлении в несколько раз больше наружного диаметра, обладающих возможностью работат с изогнутой продольной осью.

Сборный инструмент — это такой инструмент, у которого алма зоносные элементы механическим образом соединены с корпусом. Соединение может быть разъемным и неразъемным. В зависимост от формы обрабатываемой поверх-
ности различают сборный инстру-
мент для обработки плоских, ци-
линдрических, конических, сфери-

Рис. 58. Алмазный эластичный диск

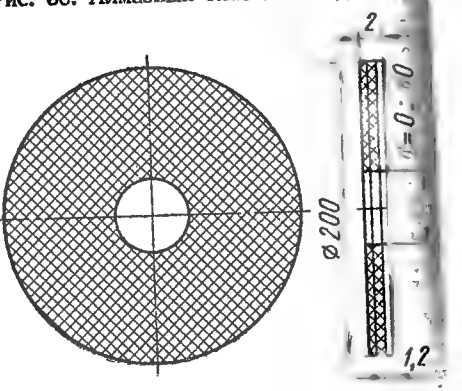
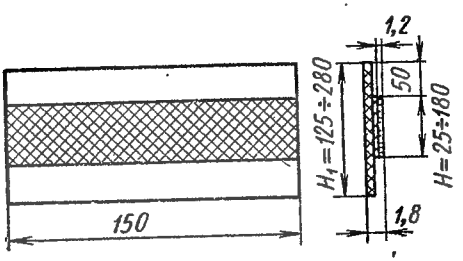


Рис. 57. Алмазная лента со свободными тканевыми концами



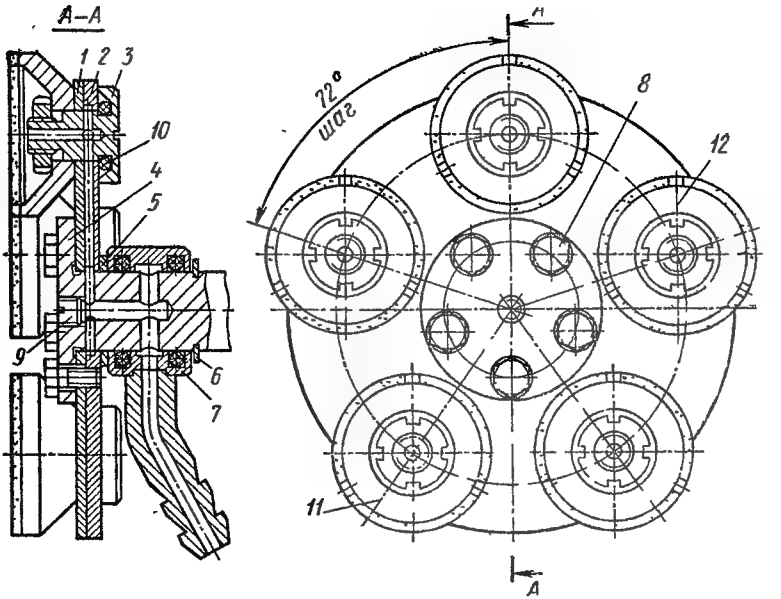


Рис. 59. Шлифовальная головка:

1 — корпус; *2* — крышка; *3* — палец; *4* — фланец; *5* — кольцо; *6* — кольцо стопорное; *7* — муфта; *8, 9* — винты; *10* — уплотнительное кольцо; *11* — гайка; *12* — круг формы АЧК

ческих, параболических и других наружных и внутренних поверхностей. На рис. 59 показан сборный алмазный инструмент (шлифовальная головка) для обработки плоских поверхностей природных облицовочных камней.

Выбор инструмента

Выбор и проектирование алмазного абразивного инструмента основаны на комплексном решении вопросов, связанных с условиями эксплуатации и технологическими возможностями его производства. Применительно к конкретным условиям использования инструмента выбирают его форму и размеры, вид рабочей поверхности, марку и зернистость алмазного порошка, марку связки, концентрацию алмаза. Практика показывает, что неправильный выбор характеристик инструмента значительно снижает эффективность его применения. Исходными данными для выбора характеристик инструмента являются: форма, размеры детали и обрабатываемой поверхности; материал обрабатываемой детали; требования к качеству и шероховатости обработанной поверхности; вид и метод обработки; конструкция и эксплуатационные характеристики станка (точность, жесткость, виброустойчивость); режимы обработки и производительность; условия обработки (охлаждение, степень механизации и автоматизации и т. п.); исходная шероховатость поверхности; величина

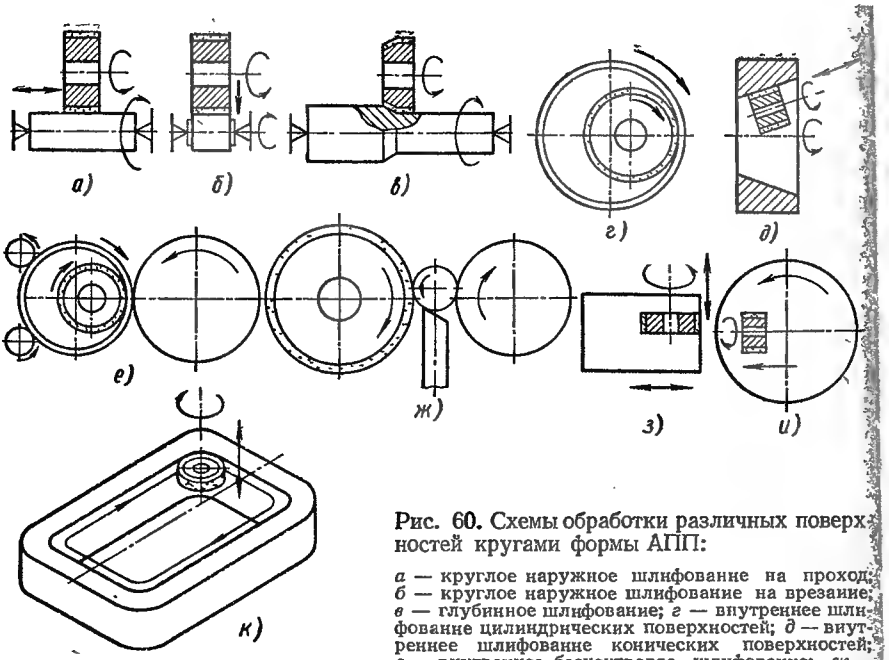


Рис. 60. Схемы обработки различных поверхностей кругами формы АПП:

а — круглое наружное шлифование на проход; *б* — круглое наружное шлифование на врезание; *в* — глубинное шлифование; *г* — внутреннее шлифование цилиндрических поверхностей; *д* — внутреннее шлифование конических поверхностей; *е* — внутреннее бесцентровое шлифование; *ж* — бесцентровое шлифование; *з* — плоское шлифование при возвратно-поступательном перемещении стола; *и* — плоское шлифование при вращательном движении стола; *к* — шлифование по контуру

снимаемого припуска. При этом необходимо учитывать технологические возможности изготовления проектируемого инструмента с требуемыми его характеристиками.

Выбор конструктивных характеристик инструмента. Выбор формы. При проектировании и применении алмазного абразивного инструмента следует стремиться к использованию стандартных форм и размеров. В тех случаях, когда возникает необходимость в использовании специальной формы инструмента, следует учитывать эксплуатационные и технологические факторы. К эксплуатационным факторам, определяющим форму инструмента, относят вид и метод обработки, конструкцию станка, форму детали и обрабатываемой поверхности; к технологическим — прессуемость шихты и физико-механические свойства алмазоносного слоя.

Вид обработки и конструкция станка, как правило, определяют группу инструмента, а следовательно, и признаки формы, характерные для данной группы. Например, на заточных и шлифовальных станках инструменту сообщается вращательное движение, а поэтому он имеет форму тел вращения — шлифовальные круги и головки. Форма рабочей поверхности инструмента выбирается в соответствии с методом обработки и формой обрабатываемой поверхности детали. Соответствие форм рабочей и обрабатываемой поверхностей особенно важно при шлифовании методом врезания, так как профиль поверхности на изделии, получаемый при обработке этим методом, является обратным профилю сечения рабочей поверхности инстру-

мента. При шлифовании на проход профиль рабочей поверхности инструмента не зависит от формы обрабатываемой поверхности. В этом случае рабочая поверхность инструмента имеет, как правило, цилиндрическую, коническую и плоскую форму или их сочетание.

Применяя различные методы обработки одним инструментом, можно получить различные по форме и размерам поверхности (рис. 60). Форма инструмента должна быть такой, чтобы его рабочая поверхность входила в контакт с обрабатываемой поверхностью детали. При этом должно обеспечиваться их взаимное перемещение на требуемую величину. Например, многолезвийный твердосплавный инструмент имеет ограниченное свободное пространство между зубьями. Поэтому для обеспечения его заточки предусмотрены шлифовальные круги формы тарелок. Чашечные круги в основном предназначены для шлифования торцом. Для того чтобы детали крепежного приспособления не выступали за торцовую рабочую поверхность и не мешали в работе, круги имеют коническую выточку.

При разработке специальных форм инструмента учитывают также технологические факторы. Следует избегать неравномерной толщины алмазоносного слоя, так как это в большинстве случаев приводит к неравномерной пропрессовке, которая в свою очередь, в процессе спекания (обжига) вызывает неравномерную усадку и напряжения, ведущие к короблению и появлению трещин. Форма инструмента и его рабочей поверхности должны быть такими, чтобы можно было легко извлечь инструмент из пресс-формы. В алмазоносном слое следует избегать впадин и выступов, расположенных в направлении, перпендикулярном к направлению прессования. Такие пазы усложняют конструкцию пресс-формы и снижают качество пропрессовки алмазоносного слоя. Существенно влияет на выбор формы прочность алмазоносного слоя на данной связке. Инструмент с тонким алмазоносным слоем и консольным его расположением на корпусе (круги формы А1Т) изготовляют на прочных, например, металлических и органических связках. Хрупкие связки (керамические) в этом случае не могут быть применены в связи с тем, что в процессе обработки, а зачастую даже при изготовлении, алмазоносный слой разрушается.

Выбор размеров инструмента определяется эксплуатационными и технологическими факторами. Эксплуатационными факторами являются: объем применения алмазного инструмента на данном предприятии, размеры обрабатываемого изделия, характеристика обрабатываемого материала, конструкция и мощность станка. Технологические факторы (прессуемость алмазоносной шихты на определенной связке, размеры и мощность технологического оборудования для изготовления) определяют минимальный и максимальный размеры алмазоносного слоя.

Как правило, следует стремиться к использованию инструмента с максимально допустимыми по условиям обработки размерами алмазоносного слоя. Это обеспечивает меньшие затраты на инструмент, так как удельная стоимость (общая стоимость изготовления, отнесенная к одному карату) (рис. 61) с увеличением количества алмазов в алмазоносном слое уменьшается.

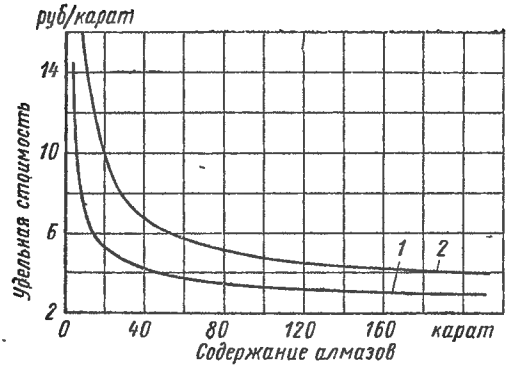


Рис. 61. Зависимость удельной стоимости алмазных шлифовальных кругов от содержания алмазов:

1 — круги формы АПП-АСО 50/40÷160/125, органическая связка, 100%; *2* — круги формы А5П-АСР 63/50, металлическая связка, 100%

Основными размерами шлифовальных и отрезных кругов, дисковых сегментных пил, шлифовальных головок и других подобных инструментов являются: наружный диаметр, ширина рабочей поверхности, толщина алмазоносного слоя, диаметр посадочного места. Основными размерами брусков являются ширина, общая высота и длина, толщина алмазоносного слоя и размеры, характеризующие профиль рабочей поверхности. Алмазные сверла, штрипсовые, канатные и цепные пилы, гибкие валы характеризуются также общей длиной и длиной рабочей части.

Наружный диаметр следует выбирать возможно большим. Такие круги обеспечивают меньший удельный расход алмазов и меньшую стоимость шлифования. При этом необходимо учитывать интервал изменения частоты вращения шпинделя станка и выбирать наружный диаметр из условия достижения оптимальной скорости шлифования для данного материала и вида обработки. Наружный диаметр увязывается также с формой и размерами обрабатываемого изделия. В качестве примеров рассмотрим выбор наружного диаметра кругов для внутреннего шлифования и для шлифования выпуклых и вогнутых сферических поверхностей. Наружный диаметр кругов для внутреннего шлифования выбирается равным 0,4—0,9 диаметра обрабатываемого отверстия, причем чем больше диаметр отверстия, тем меньше отношение.

У кольцевых кругов (АК) для обработки выпуклых или вогнутых сферических поверхностей наружный D и внутренний d диаметры определяются исходя из диаметра обрабатываемой поверхности с таким расчетом, чтобы наружная кромка инструмента перекрывала центр заготовки и несколько выходила за ее край для обеспечения свободного выхода смазочно-охлаждающей жидкости и продуктов срабатывания (рис. 62). Расчет ведется в следующем порядке. При обработке выпуклой поверхности внутренний расчетный диаметр инструмента $d = KD_0$. При обработке вогнутой поверхности наружный расчетный диаметр инструмента $D = KD_0$. Коэффициент K выбирается в зависимости от относительной высоты H_0/R_0 обрабатываемой поверхности: при $H_0/R_0 = 0{,}8 \div 1$ $K = 0{,}8$; при $H_0/R_0 = 0{,}5 \div 0{,}8$ $K = 0{,}7$; при $H_0/R_0 = 0{,}5$ $K = 0{,}6$.

Полученное расчетное значение D или d округляется до целого по нормальному ряду предпочтительных чисел $Ra20$ согласно ГОСТ

6636—60. Для получения заданного радиуса R кривизны обработанной поверхности определяется угол установки инструмента на станке для выпуклой поверхности $\sin\alpha = \frac{d}{2R_0}$, для вогнутой поверхности $\sin\alpha = \frac{D}{2R_0}$. Угол установки инструмента корректируется по мере приработки плоской поверхности инструмента на сферическую.

Ширина рабочей поверхности алмазоносного слоя выбирается в зависимости от размеров обрабатываемой поверхности, мощности и конструкции станка, способа обработки, свойств обрабатываемого материала, наличия или отсутствия охлаждения, из условия обеспечения оптимальных режимов обработки и рационального использования алмазоносного слоя. Съем обрабатываемого материала при шлифовании происходит на поверхности контакта круга и детали, площадь которой определяется шириной рабочей поверхности алмазоносного слоя и длиной контакта. Для каждого станка ширина рабочей поверхности и площадь контакта с обрабатываемой деталью выбираются из условия обеспечения оптимальной для данных условий обработки силы прижима к обрабатываемой детали, в соответствии с жесткостью системы СПИД и мощностью электродвигателя. С увеличением глубины шлифования и площади соприкосновения обрабатываемой поверхности с инструментом ширину алмазоносного слоя выбирают соответственно меньшей. Эффективное охлаждение уменьшает температуру в зоне резания, улучшает условия для удаления шлама и обеспечивает возможность применения инструмента с большей шириной рабочей поверхности.

При обработке деталей из мягких и вязких материалов, с целью облегчения условий для удаления стружки и уменьшения вероятности засаливания алмазоносного слоя, следует стремиться к уменьшению ширины рабочей поверхности алмазоносного слоя и поверхности контакта. При прочих равных условиях ширина алмазоносного слоя для станков с ручной подачей рекомендуется большей, чем для станков с механической подачей. Широкий слой при этом способствует лучшей прямолинейности перемещения детали. Следует обращать внимание на то, чтобы в процессе работы алмазоносный слой по всей ширине входил в контакт с деталью и таким образом мог равномерно изнашиваться. При обработке методом врезания ширина рабочей поверхности выбирается равной или на 0,5—1 мм

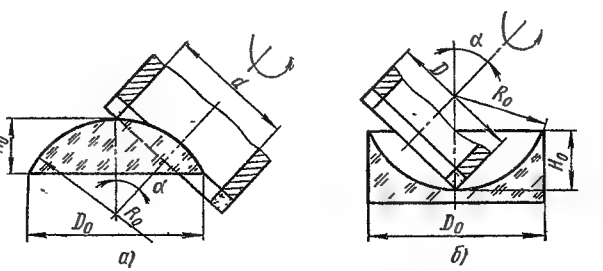


Рис. 62. Схема обработки сферических поверхностей изделий:
а — выпуклых; *б* — вогнутых

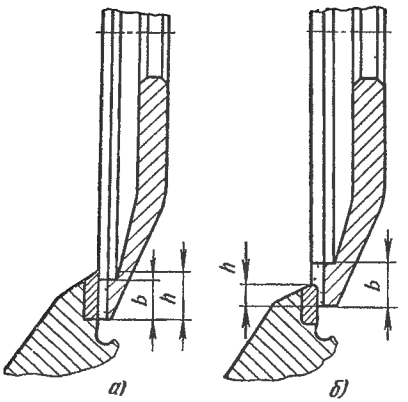


Рис. 63. Схема выбора ширины торца круга АТ для заточки передней рабочей поверхности

больше обрабатываемой ширины изделия, а профиль — соответствующий обрабатываемому.

Ширина b алмазоносного слоя алмазных шлифовальных кругов для заточки и доводки многолезвийного металлорежущего инструмента по передней грани должна быть меньше высоты h обрабатываемой поверхности (рис. 63, *а*). Это обеспечивает заточку грани без заваливания кромки. На рабочей поверхности алмазоносного слоя не образуется уступов, которые неизбежно возникают при работе круга, ширина рабочей поверхности которого больше ширины обрабатываемой поверхности (рис. 63, *б*). Для отрезных кругов ширина алмазоносного слоя выбирается в зависимости от свойств разрезаемого материала, требуемой производительности резания и жесткости корпуса. При уменьшении ширины пропила снижается энергоемкость процесса резания, повышается производительность, уменьшается расход материала в стружку, что существенно влияет на экономические показатели, особенно при резке таких дорогостоящих материалов, как германий, кремний, рубин, кварц и др. Однако уменьшение ширины алмазоносного слоя лимитируется жесткостью корпуса, которая выбирается, исходя из условия обеспечения заданных режимов обработки.

Толщина алмазоносного слоя непосредственного влияния на производительность шлифования и удельный расход алмазов не оказывает и выбирается по технологическим и экономическим соображениям. По технологическим соображениям толщина алмазоносного слоя определяется условиями прессования шихты алмазоносного слоя, величиной и соотношением его размеров в направлении прессования и перпендикулярном к нему направлении. Экспериментально установлено, что высокое качество алмазоносного слоя может быть обеспечено при толщине его не менее 1 мм для металлической связки, 1,5 мм для органической и 2 мм для керамической. Когда по условиям эксплуатации из экономических соображений целесообразно использовать инструмент с толщиной алмазоносного слоя менее 1 мм, он изготовляется электрохимическим методом. По экономическим соображениям толщина алмазоносного слоя выбирается в соответствии с объемом использования инструмента на данном предприятии. Хотя затраты на инструмент, отнесенные к одному карату, при большей толщине алмазоносного слоя меньше (см. рис. 61), первоначальные затраты на его приобретение всегда выше, что экономически невыгодно при малом объеме применения и должно быть учтено при выборе типоразмера инструмента. Например, при расходе одного-двух кругов в год толщина алмазоносного слоя должна

быть минимальной. Для удовлетворения запросов предприятий с различным объемом использования алмазных кругов стандартами предусмотрен выпуск их с толщиной алмазоносного слоя 1—7 мм.

Посадочное отверстие алмазного абразивного инструмента выбирается из условий обеспечения надежности его закрепления и жесткости шпинделя станка. Так как стандартами определен ряд размеров крепежных оправок и шпинделей станков, имеется также ряд стандартных размеров посадочных отверстий алмазных кругов. Размер посадочного отверстия, как правило, связан с наружным диаметром круга. Эта зависимость для алмазных шлифовальных кругов приведена в табл. 30. При проектировании следует выбирать стан-

Таблица 30

Зависимость диаметра посадочного отверстия от наружного диаметра шлифовальных кругов

Наружный диаметр в мм	Диаметр посадочного отверстия в мм	Наружный диаметр в мм	Диаметр посадочного отверстия в мм	Наружный диаметр в мм	Диаметр посадочного отверстия в мм
16	5; 6	63; 80	20	200	32; (75); 76
20; 25	6	100; 110	20; 32	250; 300	(75); 76; 127
30; 32	10	125	32	400	127; 203
40; 50	16	150	32; (50); 51	500	203

Примечание. В скобках указаны нерекомендуемые диаметры.

дартные диаметры посадочных отверстий и лишь в исключительных случаях при соответствующем обосновании допускаются отклонения от них. Размеры инструмента следует округлять до величины в соответствии с рядами предпочтительных чисел по ГОСТ 6636—60, причем для наружного диаметра шлифовальных кругов предпочтительным является ряд Ra10.

Выбор вида рабочей поверхности. Алмазные абразивные инструменты в настоящее время изготовляются как со сплошной, так и с прерывистой рабочей поверхностью. Применение прерывистого алмазного инструмента позволяет сократить энергоемкость процесса резания, уменьшить температуру в зоне обработки, снизить, а зачастую и устранить засаливаемость. Прерывистая рабочая поверхность улучшает условия для выноса шлама из зоны резания и, таким образом, снижает вероятность засаливания, в особенности при обработке вязких материалов и в тех случаях, когда рабочий слой постоянно находится в контакте с обрабатываемой деталью по всей площади (сверление, шлифование плоских поверхностей торцом, например, чашечными кругами и т. п.).

Для некоторых видов алмазного абразивного инструмента бо
ших размеров (алмазные отрезные сегментные круги, полосов
пилы и т. п.) прерывистая рабочая поверхность является единствен
выполнимой по технологическим соображениям. Таким образо
в некоторых случаях алмазный абразивный инструмент с прерыв
стой режущей кромкой имеет определенные преимущества пере
другими. Однако, приступая к проектированию такого инструмента,
необходимо тщательно проверить целесообразность применения ег
так как технологически изготовить прерывистый рабочий слой слож
нее. Следует учитывать при конструировании и то обстоятельство
что при обработке могут возникнуть вибрации из-за ударов высту
пов инструмента о шлифуемую поверхность.

Выбор марки и зернистости алмазного порошка. Специализиро
ванными предприятиями страны освоено производство нескольки
марок синтетических алмазов. Каждая из них выпускается опред
ленной зернистости и имеет свои наиболее рациональные области
применения:

Марка алмаза	Область применения
АСО	Шлифовальные круги на органической связке; доводочные диски
АСОМ, АСОМА	ленты на каучукосодержащей связке для доводки и чистового шли вания деталей из твердых сплавов, быстрорежущей стали и друг материалов
АСР, АСРМ	Шлифовальные круги для высокопроизводительной заточки тверд сплавного инструмента. Круги на керамической и металлическо связках для всех видов шлифования деталей из твердых сплавов полупроводниковых материалов, керамики и других твердых и хрупк материалов; хонинговальные бруски на металлических связках дл обработки деталей из серого чугуна
АСВ	Шлифовальные круги на металлических связках для обработки м таллических и неметаллических материалов; хонинговальные брус для обработки деталей из закаленной стали; инструменты на металл ческой гальванической связке
АСС, АСК	Круги, хонинговальные бруски, отрезной инструмент на металлич ских связках для обработки деталей из наиболее твердых материало в условиях повышенных нагрузок; буровой и правящий инструмент отрезные круги для резки рубина
АСМ	Инструмент для чистовых и доводочных операций; тонкие отрезны диски
АСН	Инструмент для обработки деталей из наиболее твердых материалов рубина, природного алмаза и т. п.

Зернистость алмазного абразивного инструмента влияет на ше
роховатость обработки (табл. 31), удельный расход алмазов и произ
водительность, а следовательно, на стоимость шлифования. С умень
шением зернистости снижается шероховатость обработанной поверх
ности, но возрастает стоимость обработки, так как повышается удель
ный расход алмазов и снижается производительность. При необхо
димости съема большого количества материала и обеспечения высо
кого класса шероховатости поверхности целесообразно общий съем
материала разделить на две последовательные операции — черно
вую, выполняемую более крупнозернистым инструментом, обеспечи
вающим необходимую производительность, и чистовую, выполняе
мую более мелкозернистым инструментом, обеспечивающим требуе

Таблица 31

Рекомендуемая зернистость алмазных кругов в зависимости от шероховатости поверхности при обработке деталей из твердого сплава

Класс шероховатости	Шлифование		Заточка			Доводка
	Металлическая и керамическая связки	Органическая связка	Металлическая связка	Керамическая связка	Органическая связка	Органическая связка
8—9	АСР 125/100—80/63	АСО 160/125—100/80	АСР 125/100—80/63 АСВ 125/100—80/63	АСР 250/200—200/160	АСР 160/125—100/80 АСОМ 160/125—100/80 АСРМ 160/125—100/80	—
9—10	АСР 80/63—50/40	АСО 100/80—50/40	АСР 80/63—50/40 АСВ 80/63—50/40	АСР 200/160—100/80	АСО 100/80—63/50 АСРМ 100/80—63/50 АСОМ 100/80—63/50	—
10—11	—	АСО 50/40 АСМ 40/28	—	АСР 63/50 АСМ 40/28	—	АСО 50/40 АСМ 40/28
11—12	—	АСМ 40/28—14/10	—	—	—	АСМ 40/28—14/10
12—13	—	АСМ 14/10—7/5	—	—	—	АСМ 14/10—7/5

мую шероховатость обработанной поверхности. Можно применить также инструмент с комбинированными характеристиками алмазоносного слоя, когда, например наружное кольцо, предназначенное для обдирки, имеет большую зернистость по сравнению с внутренним кольцом, предназначенным для обеспечения требуемого класса шероховатости.

Расчет массы и выбор концентрации алмазов. Одной из важнейших характеристик алмазного абразивного инструмента, определяющих его режущую способность, производительность, срок службы и стоимость, является концентрация алмаза, т. е. весовое содержание алмаза в единице объема алмазоносного слоя. За 100%-ную концентрацию условно принято содержание алмаза в количестве 4,4 карата в 1 см³ алмазоносного слоя, или 0,88 мг/мм³, что соответствует 72 каратам в одном кубическом дюйме (норма, впервые принятая в США). Приняв плотность алмазов равной 3,52 г/см³, определим объем, который занимают алмазы в 1 см³:

$$V = \frac{0{,}88}{3{,}52} = 0{,}25 \text{ см}^3.$$

Следовательно, независимо от вида связки (органическая, металлическая или керамическая) при 100%-ной концентрации алмазные зерна в алмазоносном слое занимают 25% по объему.

Расчет весового содержания алмазов в инструменте. Исходными данными для расчета весового содержания алмазов в инструменте являются: объем алмазоносного слоя V и концентрация K алмазов в алмазном слое (в процентах):

$$A = \frac{4{,}4}{100} VK \text{ каратов},$$

где 4,4 — содержание алмазов в 1 см³ алмазоносного слоя при 100%-ной концентрации в каратах.

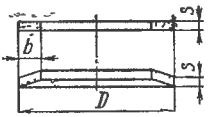
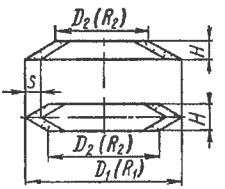
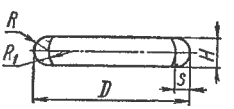
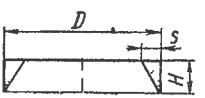
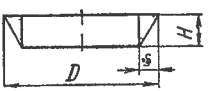
Подставив в эту формулу применяемые значения концентраций, получим более простые формулы для подсчета весового содержания алмазов в зависимости от концентрации:

Концентрация в %	Формулы для расчета	Концентрация в %	Формулы для расчета
25	$A = 1{,}1V$	125	$A = 5{,}5V$
50	$A = 2{,}2V$	150	$A = 6{,}6V$
75	$A = 3{,}3V$	175	$A = 7{,}7V$
100	$A = 4{,}4V$	200	$A = 8{,}8V$

Расчет объема алмазоносного слоя производят в зависимости от его геометрической формы. В табл. 32 приведены формулы для расчета объема часто встречающихся форм алмазоносного слоя кругов. Очень важным при расчете является соблюдение правил и точности округлений полученных результатов. Излишняя точность принятых значений весового содержания алмазов в инструменте

Таблица 32

Формулы для расчета объема алмазоносного слоя

Сечение алмазного слоя	Формула
	$V = \pi b S (D - b)$
	$V = \pi H S (R_1 + R_2 - S)$
	$V = 2\pi \left\{ \frac{\pi}{2} R^2 \left(\frac{D}{2} - R \right) + \frac{H}{2} \left(\frac{D}{2} - R \right)^2 - \right.$ $\left. - \left(\frac{D}{2} - S - R_1 \right) \left(\alpha R_1^2 + \frac{H}{4} \sqrt{4R_1^2 + H^2} \right) - \right.$ $\left. - \frac{H}{2} \left(\frac{D}{2} - S - R_1 \right)^2 - \frac{H}{2} R_1^2 + \frac{H^3}{8} \right\};$ $H = 2R; \quad \alpha = \arcsin \frac{H}{2R_1}$
	$V = 1{,}047 H S (1{,}5D - S)$
	$V = 1{,}047 H S (1{,}5D - 2S)$

снижает производительность при подготовке крупных навесок алмазного порошка, так как вызывает необходимость взвешивания их на аналитических весах, усложняет учет и отчетность при изготовлении и использовании алмазного абразивного инструмента, а также при определении потребности в нем. Имеется методика расчета весового содержания алмазов в инструменте, которая определяет технически обоснованные нормы точности полученных результатов. В соответствии с этой методикой полученные значения объема алмазоносного слоя округляются следующим образом:

Объем в см³	До 1	1—10	10—100	100—500	Св. 500
Точность округления	0,001	0,01	0,1	0,5	1

Масса алмазов, рассчитанная по вышеприведенным формулам, округляется так:

Масса алмазов в каратах	До 3	3—30	30—500	500—2000	Св. 2000
Точность округления	0,01	0,1	1	5	10

При округлении необходимо соблюдать следующие общепринятые правила:

а) если последняя отбрасываемая цифра меньше 5, то она не учитывается;

б) если последняя отбрасываемая цифра больше 5, то предыдущая округляется в большую сторону;

в) если последняя отбрасываемая цифра равна 5, а перед ней стоит четная цифра, то цифра 5 не учитывается, а когда перед ней стоит нечетная цифра, то она округляется до четной.

Выбор концентрации определяется экономическими соображениями. Эффективность инструмента с высокой концентрацией будет зависеть от степени использования алмазных зерен, т. е. насколько долго связка и условия шлифования позволят обеспечить работу алмазных зерен и предотвратить их преждевременное вырывание из связки. Там, где эти условия обеспечиваются, инструмент с высокой концентрацией работает эффективнее инструмента с низкой концентрацией. Из-за дефицитности природных алмазов до освоения промышленного производства синтетических в основном применялись инструменты с концентрацией 25 и 50%. В настоящее время наиболее распространенной является концентрация свыше 100%. В целом ряде случаев переход к более высокой концентрации обеспечил более высокую эффективность применения инструмента, снижение затрат и удельного расхода алмазов. Поэтому в настоящее время круги на органической связке для обработки твердосплавных деталей в большинстве случаев изготовляются с концентрацией алмазов 100 и 150%, на металлической 125—200%, на керамической 100%. Однако не во всех случаях высокая концентрация является оптимальной. При шлифовании и разрезке неметаллических материалов концентрация шлифовальных и отрезных кругов выбирается в пределах 12,5—75%.

Выбор концентрации зависит от формы и размеров рабочей поверхности, зернистости алмазного порошка, износостойкости связки, условий работы и предъявляемых требований в отношении производительности шлифования и стойкости инструмента.

При небольшой величине поверхности контакта шлифовального круга с деталью увеличивается давление на рабочий слой, что, в свою очередь, ведет к повышенному износу. Для уменьшения износа в этом случае наряду с применением износостойких связок следует повышать концентрацию алмазов. Стойкость профиля и прочность кромок с увеличением концентрации повышаются. Наряду с другими факторами на производительность резания и стойкость влияет также и число рабочих зерен на единице площади рабочей поверхности.

При одинаковой концентрации в алмазоносном слое количество (в штуках) мелких алмазных зерен больше, чем в слое, содержащем крупные алмазы. Следовательно, концентрация мелкозернистых кругов может быть ниже. При крупной зернистости следует применять инструмент с более высокой концентрацией.

Механическое шлифование на высокопроизводительных шлифовальных станках обеспечивает равномерность условий шлифования, и поэтому эффективно могут использоваться круги с высокой концентрацией. При этом обеспечивается высокая производительность резания при незначительном износе круга. Шлифование с охлаждением, как правило, повышает износостойкость связки, а следовательно, позволяет эффективно работать инструменту с повышенной концентрацией алмаза (150—200%).

Выбор связки. Связкой называется материал, служащий для закрепления зерен алмазного порошка в алмазоносном слое. Наполнитель является компонентом связки, он повышает стойкость, улучшает режущие свойства алмазного абразивного инструмента, определяет физико-механические, теплофизические и другие свойства алмазоносного слоя. В качестве наполнителей используют абразивные и металлические порошки, органические вещества. Связка наряду с концентрацией, маркой и зернистостью алмазного порошка является одной из основных характеристик, определяющих работоспособность и эффективность алмазного абразивного инструмента. Поэтому к ней предъявляется целый ряд требований. Связка должна:

а) обладать хорошей смачиваемостью по отношению к алмазу;

б) прочно удерживать алмазные зерна;

в) обеспечивать самозатачивание, т. е. по мере затупления алмазных зерен должна изнашиваться, способствуя выпадению затупившихся зерен и вскрытию режущих граней новых зерен;

г) обладать достаточной термостойкостью и иметь хорошую теплопроводность;

д) в паре с обрабатываемым материалом иметь минимальный коэффициент трения;

е) иметь коэффициент линейного расширения, приближающийся к коэффициенту линейного расширения алмаза;

ж) не вступать в химическое взаимодействие с обрабатываемым материалом и охлаждающей жидкостью.

В настоящее время алмазно-абразивный инструмент выпускается на органических, металлических и керамических связках. В качестве связующих органических связок используются синтетические смолы, чаще всего типа фенолформальдегидных, и композиции на их основе. Наиболее распространенные органические связки Б1, Б2, Б3, Б4 и БР представляют собой композиции на основе связующего порошкообразного бакелита ПБ (ГОСТ 3552—63). Они отличаются между собой наполнителем, который определяет механическую прочность алмазоносного слоя, сопротивляемость износу, теплостойкость и другие физико-механические свойства. В качестве наполнителя для связок Б1, Б2, Б3, БР используется соответственно карбид бора, железный порошок, белый электрокорунд и резиновая мука. Для ин-

струмента на органических связках применяются в основном синтетические алмазы марки АСО, зерна которых имеют развитую шероховатую поверхность с большим количеством выступов и углублений, вследствие чего они прочно удерживаются в связке.

Повышенная хрупкость алмазных зерен марки АСО способствует быстрому восстановлению режущих свойств круга за счет частичного выкрашивания зерен. Эффективность органических связок в последнее время значительно повышена путем применения металлизированных алмазных порошков. Разработан также ряд новых высокоэффективных органических связок, таких, как Б8, Б156, Р1, Р9. В зависимости от жесткости органические связки можно условно разделить на жесткие Б1, Б2, Б3, Б4, Б8, Б156, БР и эластичные Р1, Р9.

Металлические связки более прочно удерживают алмазные зерна по сравнению с органическими связками, и поэтому алмазоносный слой на их основе более износостойкий. Для изготовления инструмента на металлических связках используются более прочные синтетические алмазы, такие, как АСР, АСВ и АСК, а также порошки из природных алмазов. В качестве связки используются различные композиции на основе меди, олова, алюминия, железа, никеля и других материалов. Состав связки выбирается с учетом вышеуказанных требований, а также чтобы температура спекания инструмента была ниже температуры сгорания и графитизации алмазов. В особую группу выделяют инструмент на металлических связках, который изготовляется различными электрохимическими методами. Закрепление алмазных зерен электрохимическими методами не требует применения сложных, зачастую дорогостоящих пресс-форм и позволяет изготовлять алмазно-абразивный инструмент со сложным фасонным профилем. Инструмент на металлических связках используется в основном для обработки высокопрочных, обладающих абразивной способностью материалов, когда в процессе обработки на алмазные зерна действуют повышенные нагрузки.

Керамические связки изготовляются из порошка стекла, огнеупорных глин, предварительно обожженных и измельченных, и других керамических композиций. По удельному расходу керамические связки занимают промежуточное положение между органическими и металлическими, однако в определенных условиях могут давать лучшие экономические показатели. Например, алмазные шлифовальные круги на керамической связке К1 с высокой эффективностью применяются при заточке твердосплавного режущего инструмента совместно со стальной державкой и при шлифовании деталей из чугуна и стали. В инструменте на керамических связках в основном используются синтетические алмазы марки АСР. Инструмент на органических связках применяется с охлаждением и без охлаждения, а инструмент на металлических и керамических связках, — как правило, с охлаждением.

Связка оказывает влияние на конструкцию инструмента. Так, в зависимости от связки выбирается материал корпуса, метод соединения алмазоносного слоя с корпусом и определяется содержание

рабочих чертежей. Физико-механические свойства связок и технология их изготовления предопределяют возможную для получения форму и размеры алмазно-абразивного инструмента. Например, ввиду хрупкости существующие керамические связки не могут быть применены для изготовления отрезных кругов. Как показала практика, неправильный выбор марки и концентрации алмаза или связки может привести к двукратному и даже пятикратному увеличению удельного расхода алмазов, повышению стоимости обработки и снижению эффективности применения алмазов.

Технические условия на инструмент

Технические условия, как правило, состоят из трех основных разделов: технические требования; правила приемки и методы испытаний; правила маркировки, упаковки, транспортирования и хранения.

Технические требования определяют качество (надежность и долговечность) инструмента и его товарный вид. Основными показателями качества инструмента являются: точность размеров и формы алмазоносного слоя и корпуса; прочность инструмента (алмазоносного слоя и корпуса, а также их соединения); уравновешенность (относится к вращающемуся инструменту); работоспособность алмазоносного слоя.

Точность размеров и формы алмазного абразивного инструмента оказывает существенное влияние на точность и шероховатость обрабатываемой поверхности, на удельный расход алмазов и на другие технико-экономические показатели его работы. Отклонения от параллельности и перпендикулярности, радиальное и торцовое биения смещают центр массы кругов от оси вращения и в процессе обработки приводят к вибрации станка. Вибрации ускоряют износ круга, ухудшают качество обработанной поверхности, приводят к быстрому износу подшипников шпинделя. Однако изготовление алмазного абразивного инструмента с высокой точностью связано с большими технологическими трудностями. Чем точнее алмазный абразивный инструмент, тем больше времени и средств требуется на его изготовление, тем выше стоимость. Поэтому в каждом конкретном случае точность инструмента должна быть экономически обоснована.

Существующими техническими условиями определены следующие нормы точности алмазного абразивного инструмента. Допускаемые отклонения размеров инструмента не должны превышать: для диаметра посадочного отверстия кругов, кроме А1ПП — 2-го класса точности (ОСТ 1012); для диаметра посадочного отверстия и наружного диаметра кольцевых сверл и диаметра посадочного отверстия отрезных сегментных кругов — 3-го класса точности (ОСТ 1013); для диаметра хвостовика шлифовальных головок и высоты хонинговальных брусков — 4-го класса точности (ОСТ 1014); для диаметра посадочного отверстия кругов А1ПП — 5-го класса точности (ОСТ 1015); для наружного диаметра кругов и ручных брусков формы АБК — 5-го класса точности (ОСТ 1015) с симметричным расположением поля допуска; для остальных размеров — 7-го класса точности (ОСТ 1010).

Таблица 33

Допустимые биения отрезных кругов

Диаметр круга в мм	Биение в мм	
	торцовое	радиальное
50, 75	0,06	0.04
80, 90, 100	0,10	
125, 160, 200	0,10	0,05
250	0,16	
320, 400	0,16	0,06

Предельные отклонения от параллельности и перпендикулярности, значения радиального и торцового биения рабочей поверхности относительно посадочного отверстия круга должны быть не ниже VII степени точности, а для кругов А1ПП — VIII степени точности (ГОСТ 10356—63). Предельные отклонения от параллельности и перпендикулярности, значения торцового биения для нерабочей поверхности должны быть не ниже IX степени, а радиального биения — VIII степени точности. Радиальное и торцовое биения алмазоносного слоя отрезных кругов не должны превышать величин, указанных в табл. 33.

Прогиб хонинговальных брусков не должен превышать: 0,15 мм при длине бруска до 50 мм; 0,2 мм при длине 50—75 мм; 0,25 мм — при длине 100—150 мм. По специальному заказу инструмент может быть изготовлен с более высокой точностью.

Прочность инструмента должна быть такой, чтобы обеспечить обработку заготовок при заданных режимах резаиия без поломок алмазоносного слоя и корпуса, а также без отрыва и отслоения алмазоносного слоя от корпуса. Прочность зависит от материала связки и корпуса, средств и метода их соединения. Основную опасность для разрушения шлифовальных кругов представляют центробежные силы. Поэтому круги испытывают на прочность на специальном станке со скоростью вращения, превышающей допустимую рабочую скорость на 50%. Скорость плавно увеличивают до испытательной величины, после чего круг вращают не менее 5 мин. В обязательном порядке испытывают круги диаметром 100 мм и выше. Круги меньших диаметров, шлифовальные головки и другие инструменты на прочность, как правило, не испытывают, так как центробежная сила, зависящая от диаметра, в этом случае меньше и не представляет опасности для разрушения.

Уравновешенность вращающихся алмазных абразивных инструментов существенно влияет на качество обработанной поверхности, стойкость алмазоносного слоя и срок эксплуатации станка. Большие неуравновешенные массы в процессе вращения создают переменную нагрузку на подшипники шпинделя станка и преждевременно выводят их из строя. Поэтому круги диаметром свыше 100 мм, толщиной корпуса свыше 5 мм и массой 0,1—50 кг должны подвергаться статической балансировке в динамическом режиме. Предельное смещение центра массы круга относительно оси вращения в зависимости от массы круга не должно превышать следующих величин:

Масса круга в кг	До 1	1—3	3—10	10—50
Предельное смещение в мкм	40	32	25	20

Предельно допустимый дисбаланс круга $E = Me$ (в г·см), где M — масса круга в г; e — предельное смещение центра массы в см (ГОСТ 16181—70). Измерение и устранение дисбаланса кругов производят на балансировочных станках. Круги массой до 10 кг рекомендуется балансировать на станках общего назначения ДБ-10 и 9710 или на специальном станке ЭЗ-27, предназначенном для алмазных кругов; круги массой 10—50 кг — на станке общего назначения ДБ-50. Перед определением дисбаланса алмазный круг взвешивают. Точность округления массы круга должна соответствовать следующим величинам:

Масса круга в кг	До 0,4	0,4—1	1—3	3—10	10—50
Точность округления	0,03	0,05	0,1	0,5	1

Затем в зависимости от округленной массы круга по имеющейся в ГОСТ 16181—70 таблице определяют предельно допустимый остаточный дисбаланс. После этого круг устанавливают на балансировочный станок, где измеряют фактический дисбаланс и место его расположения. Если он превышает предельно допустимое значение, то круг уравновешивают. Уравновешивание может производиться путем высверливания материала корпуса на тяжелой стороне или нанесения дополнительной массы материала на легкую сторону круга. При уравновешивании кругов на станках общего назначения, как правило, применяют метод высверливания. Глубина сверления при этом не должна превышать половины толщины корпуса, а количество отверстий — не более трех, размещенных на корпусе с учетом сохранения товарного вида круга. На станке ЭЗ-27 уравновешивание производится автоматически путем нанесения металла на легкую сторону корпуса круга в процессе измерения дисбаланса.

Работоспособность инструмента определяется удельным расходом алмаза, мощностью и производительностью шлифования, шероховатостью обработанной поверхности. При определении расхода алмазного инструмента, потребности в нем, стоимости обработки, а также оптимального значения концентрации значительно проще, наглядней и выгодней пользоваться показателем удельного расхода алмазов q_v (мг/см^3), q_p (мг/г) или q_s (мг/см^2), так как эти показатели непосредственно указывают на расход алмаза. Например, показатель q_s применяют в расчетах расхода алмаза при работе отрезных и сегментных кругов, а также штрипсовых пил, поскольку здесь проще определить площадь пропила, чем вычислить объем или массу снятого при этом материала. Удельный расход алмаза, определяемый методом взвешивания,

$$q_p = \frac{\Delta P_{кр} \alpha}{\Delta P} \text{ мг/г},$$

где $\Delta P_{кр}$ — разность массы круга до и после опыта в мг;
ΔP — разность массы образца до и после опыта в г;
α — коэффициент, определяющий количество алмазов в алмазоносном слое в мг; выбирается по таблицам в зависимости от марки связки и концентрации.

Удельный расход алмазов, определяемый методом измерения износа алмазоносного слоя круга,

$$q_p = \frac{\Delta H \beta}{\Delta P} \text{ мг/г},$$

где ΔH — износ алмазоносного слоя круга в мкм;
β — коэффициент, указывающий количество алмаза в слое в мг/мкм.

Коэффициент

$$\beta = \frac{200A}{H},$$

где A — масса алмазов в круге в каратах;
H — толщина алмазоносного слоя в мкм.

В зарубежной литературе работоспособность обычно характеризуют коэффициентом шлифования G, который выражает отношение объема снятого материала к объему сработанного алмазоносного слоя. Переход от коэффициента шлифования к удельному расходу алмаза выражается формулами:

$$G = \frac{8{,}8K}{\gamma_м} \cdot q_p^{-1};$$

$$q_p = \frac{8{,}8K}{\gamma_м} \cdot G^{-1} \text{ мг/г},$$

где K — концентрация алмазоносного слоя в %;
$\gamma_м$ — плотность материала в г/см^3.

Эффективная мощность определяется как разность общей мощности $N_{общ}$ и мощности холостого хода $N_{х.\,х}$ электродвигателя станка:

$$N_{эф} = N_{общ} - N_{х.\,х}.$$

Общая мощность и мощность холостого хода снимаются с показаний самопишущего ваттметра, например Н-348. В процессе проверки работоспособности алмазного абразивного инструмента может регистрироваться один или несколько показателей. Например, работоспособность ручных брусков определяется по шероховатости обработанной поверхности, тогда как для кругов она характеризуется удельным расходом и эффективной мощностью. Техническими условиями на инструмент устанавливаются нормы показателей работоспособности для каждого инструмента и связки, объем и средства для проведения испытаний, необходимая точность проводимых измерений, а также определяются дополнительные показатели, характеризующие качество и товарный вид инструмента — отсутствие отслаиваний, трещин и сколов, предельные размеры раковин и выкрашиваний, соответствие товарного вида существующим нормам промышленной эстетики.

Товарный вид инструмента зависит от шероховатости основных и вспомогательных поверхностей, места расположения знаков мар-

кировкй и соотношения их размеров с размерами инструмента. Посадочная поверхность кругов (кроме А2ПП) должна быть не ниже 7-го класса шероховатости, остальные поверхности (кроме алмазоносного слоя) —6-го класса. Шероховатость основных и вспомогательных поверхностей инструмента оговаривается в рабочих чертежах. Знаки маркировки, место расположения и размер, как правило, также оговариваются в рабочих чертежах и выполняются по ГОСТ 2930—62. Для приданий товарного вида инструмент иногда окрашивают.

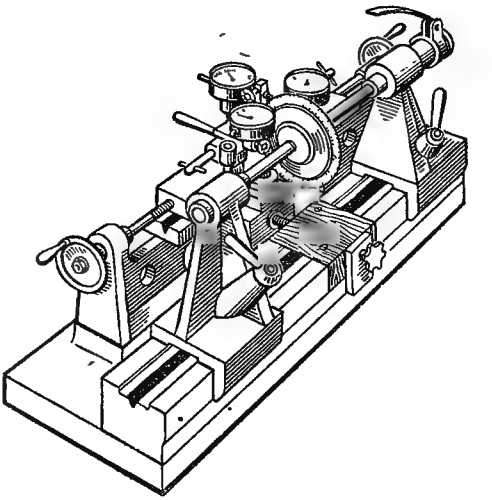


Рис. 64. Стенд для контроля радиальиого и торцового биения

Правила приемки и методы испытаний устанавливают порядок отбора, методы, средства и объем проверки всех параметров образцов, оговоренных в разделе «Технические требования». Внешнему осмотру, сравнению с эталонами шероховатости и образцами готовой продукции, утвержденными в установленном порядке, подвергают весь выпускаемый инструмент.

Радиальное и торцовое биение круга проверяют на оправке с помощью индикатора (рис 64). Радиальное биение оправки не должно превышать IV степени точности по ГОСТ 10356—63. Балансировка, испытания инструмента на прочность и режущую способность производятся в соответствии с инструкциями. Измерение размеров раковин и выкрашиваний, а также наружный осмотр с целью обнаружения трещин производятся под микроскопом с 24-кратным увеличением и измерительной шкалой. Глубину раковин измеряют индикатором с коническим наконечником.

Правила маркировки, упаковки, транспортирования и хранения. Маркировка должна содержать сведения, информирующие потребителя об основных характеристиках инструмента. Тара для упаковки должна обеспечивать сохранность свойств и качества инструмента при хранении и транспортировании. Она также должна отвечать современным требованиям технической эстетики. На корпусе инструмента, в местах, оговоренных рабочими чертежами, наносят знаки маркировки, характеризующие: форму инструмента и его основные размеры; марку и зернистость алмазного порошка; концентрацию алмазов; марку связки; порядковый номер инструмента; товарный знак завода-изготовителя; год выпуска (рис. 65). На инструментах, форма и размеры которых не позволяют производить вышеуказанную маркировку (круги диаметром до 60 мм, цилиндрические головки, хонинговальные бруски и т. п.), наносят только порядко-

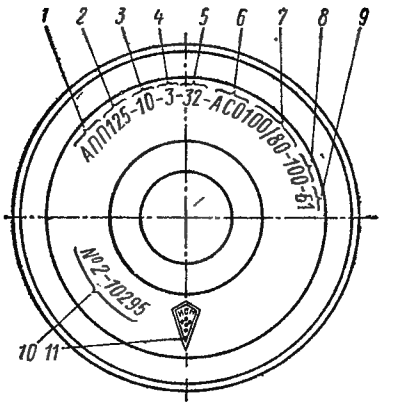


Рис. 65. Маркировка алмазного шлифовального круга:

1 — тип инструмента; *2* — наружный диаметр; *3* — ширина алмазоносного слоя; *4* — толщина алмазоносного слоя; *5* — диаметр посадочного отверстия; *6* — марка алмаза; *7* — зернистость алмазного порошка; *8* — концентрация алмазов; *9* — обозначение связки; *10* — номер инструмента; *11* — товарный знак

вый номер инструмента, комплекта или партии, а полную маркировку производят на бирках. Материал, форму, размеры и метод закрепления бирок выбирают в соответствии с утвержденными образцами. Если товарный знак не помещается между номером инструмента и годом выпуска, допускается ставить его в другом удобном месте на нерабочей поверхности инструмента.

Каждый инструмент упаковывают в соответствующую тару, не допускающую его повреждение. Корпуса инструментов, подверженные коррозии, перед упаковкой тщательно очищают и покрывают противокоррозийным составом. Каждый инструмент или партию сопровождают паспортом, где указывают организацию, в которую входит завод-изготовитель, наименование и форму инструмента, основные размеры, марку и зернистость алмазного порошка, концентрацию алмазов в процентах, марку связки, массу алмаза в каратах. Упакованный инструмент укладывают в ящики вместе с упаковочной ведомостью и краткой инструкцией по эксплуатации. Перевозят инструмент в крытом транспорте. Инструмент хранят в помещениях с температурой не ниже плюс 5° С и относительной влажностью воздуха до 65%.

Разработка конструкции инструмента и оформление рабочих чертежей

По конструктивным признакам алмазный абразивный инструмент можно разделить на несколько видов. К первому относятся инструменты, которые не имеют корпуса, например круги А1ПП. Второй вид включает инструменты, состоящие из цельного корпуса (державки) и алмазоносного слоя, например, алмазные шлифовальные круги на органической связке, хонинговальные бруски, отрезные круги, алмазные гильзы и т. п. Третий вид инструмента характеризуется тем, что для соединения алмазоносного слоя с корпусом используется переходной элемент, например, при изготовлении кругов АЧК, АПВ, АПВД, АПП на металлической связке алмазоносный слой крепится к стальному переходному кольцу, который напрессовывается на алюминиевый корпус. Для обработки больших поверхностей применяют сборные инструменты, состоящие из корпуса и закрепленных на нем алмазных элементов, в качестве которых могут быть использованы любые из вышеописанных конструкций.

Рабочие чертежи могут включать: общий вид, чертеж корпуса, чертеж алмазоносного слоя с переходным элементом, чертеж переходного элемента, чертежи дополнительных узлов и деталей. Выполнение и оформление рабочих чертежей производят с соблюдением всех требований ЕСКД.

На общем виде инструмента приводятся (рис. 66): чертеж инструмента с окончательными размерами (количество видов и сечений выбирается из условия полного раскрытия конструктивных особенностей инструмента); основные размеры инструмента (размеры алмазоносного слоя, посадочного отверстия, габаритные размеры, окончательные размеры, получаемые после сборки) и их точность; предельные отклонения от формы рабочих и нерабочих поверхностей алмазоносного слоя; шероховатость основных и вспомогательных поверхностей корпуса (если корпус после соединения с алмазоносным слоем не подвергается механической обработке, шероховатость указывается для контроля); место, содержание и размер знаков маркировки; метод соединения алмазоносного слоя с корпусом (если алмазоносный слой и корпус изготовляются отдельно); остальные технические требования или ссылка на документ (ГОСТ, ТУ, стандарт предприятия), в котором они содержатся.

В рабочих чертежах корпуса (рис. 67) алмазоносного слоя с переходным элементом (рис. 68) и переходного элемента (рис. 69) должны содержаться все сведения, необходимые для изготовления, промежуточного операционного контроля и сборки инструмента. Детали на рабочих чертежах изображают в том виде и с теми размерами, предельными отклонениями и обозначениями шероховатости поверхности, с которыми они поступают на сборку.

Выбор материала корпуса зависит от связки, механических нагрузок при эксплуатации и теплового режима при изготовлении и эксплуатации инструмента. Корпус должен быть достаточно прочным; коэффициенты линейного расширения его материала и алмазоносного слоя — близкими; должен обладать хорошей теплопроводностью для обеспечения отвода тепла в процессе эксплуатации.

Корпуса инструмента на органической связке изготовляют из алюминия, стали и алюмобакелита, пластмассы и ткани. Стальные и алюминиевые корпуса обладают большей прочностью по сравнению с алюмобакелитовыми и пластмассовыми. Кроме того, корпуса из алюмобакелита и пластмасс в процессе старения деформируются. Поэтому их применяют лишь для корпусов диаметром до 150 мм. Наиболее часто корпуса инструмента на органических связках изготовляют из алюминиевого сплава АК6. Когда при малой толщине корпуса требуется повысить прочность инструмента, применяют конструкционные стали 35 или 45. Для увеличения жесткости шлифовальных головок их корпуса изготовляют из калиброванной углеродистой стали. В качестве несущей основы для эластичного инструмента на органических связках применяют различные ткани, например, лавсановые ТТ-194 или ТТ218.

Корпуса инструмента на металлических связках в основном изготовляют из стали. При этом наиболее часто применяют стали Ст 3

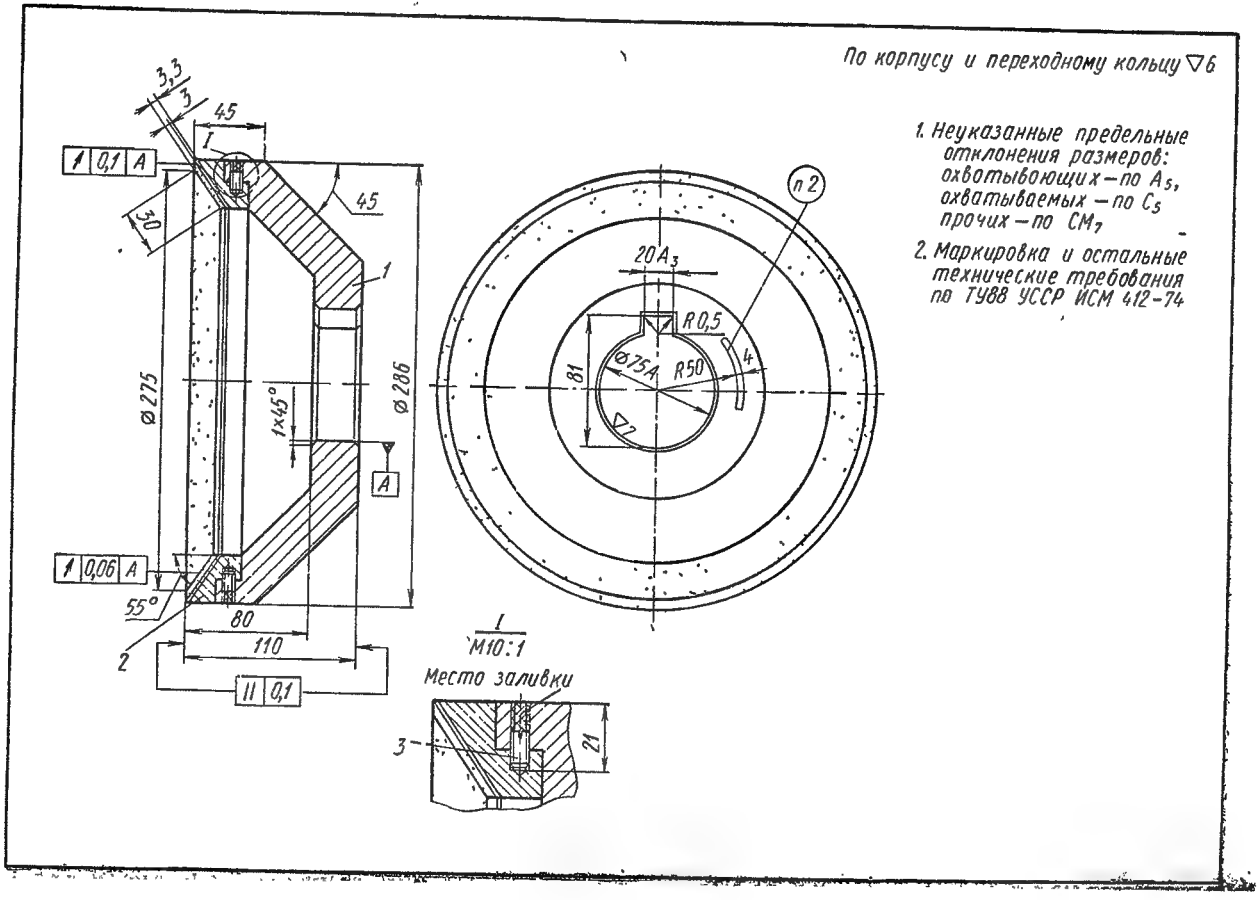


Рис. 66. Алмазный круг:

1 — корпус; *2* — переходной элемент; *3* — стопорный винт

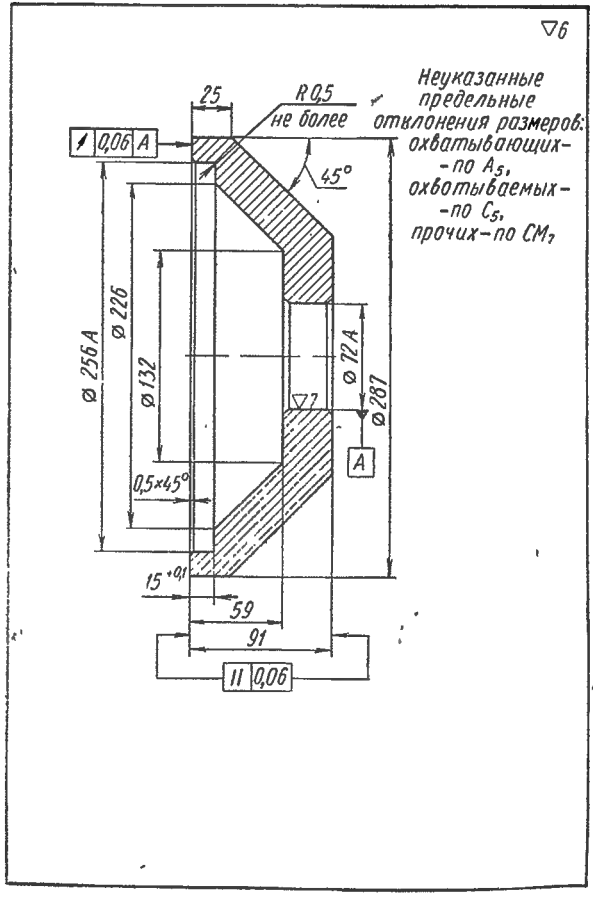


Рис. 67. Корпус круга

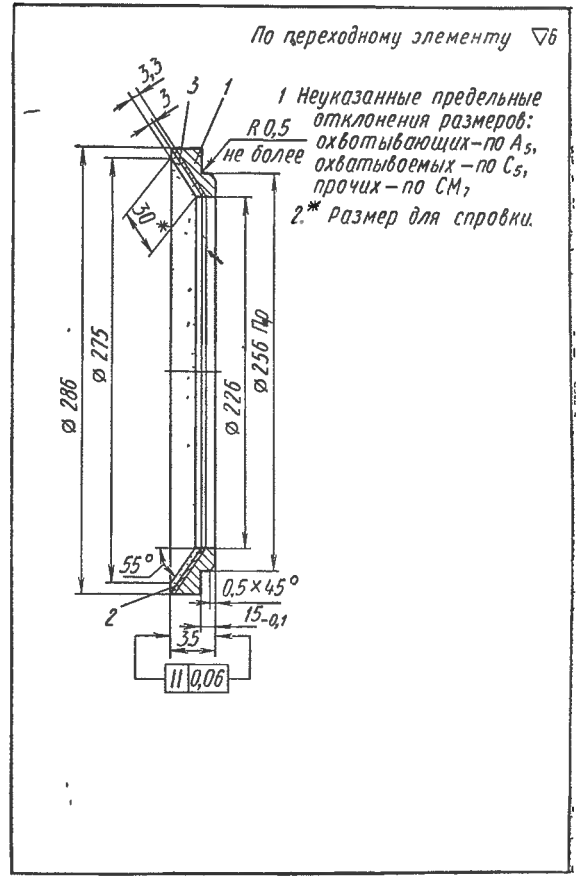


Рис. 68. Переходной элемент с алмазоносным слоем:

1 — переходной элемент; *2* — безалмазный слой; *3* — алмазоносный слой

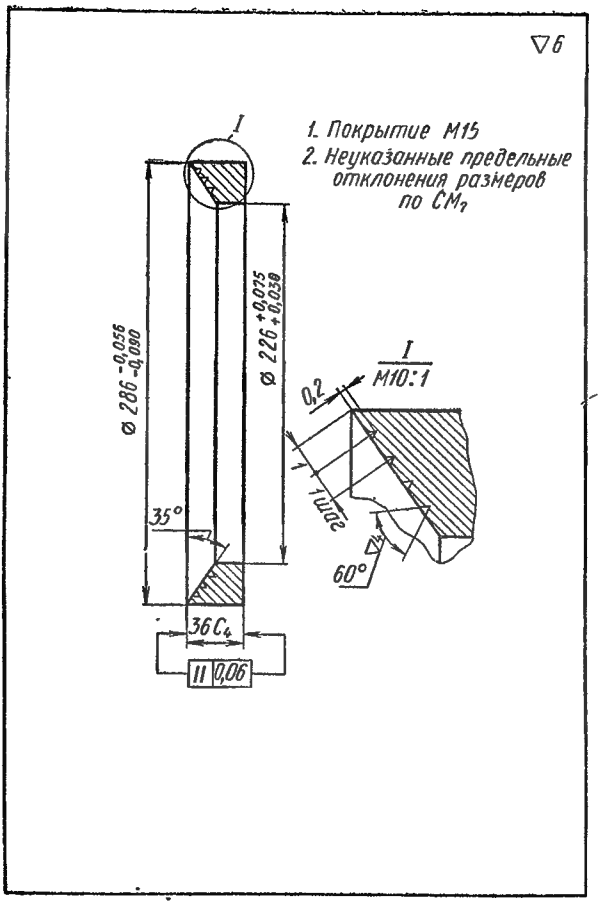


Рис. 69. Переходной элемент

и 45 — для шлифовальных кругов и хонинговальных брусков; сталь; 9ХФ — для сегментных отрезных кругов; сталь У8А — для шлифовальных головок. Для облегчения больших шлифовальных кругов корпуса изготовляют из алюминиевого сплава АК6. В этом случае алмазоносный слой напрессовывают на стальное переходное кольцо, которое затем соединяют с корпусом. При выборе материала корпуса следует учитывать, что спекание инструмента на металлических связках производят при высоких температурах (500—800° С). В этих условиях корпус (переходное кольцо) не должен плавиться и иметь большие деформации в результате остаточных напряжений. При выпуске инструмента простой формы, например хонинговальных брусков, корпус можно изготовлять из металлического порошка одновременно с алмазоносным слоем. Для изготовления ручек притиров, корпусов доводочного инструмента, т. е. в тех случаях, когда к корпусу не предъявляются высокие требования по точности формы и размеров, прочности и жесткости, используют пластмассы.

Выбор технологических припусков на механическую обработку. Для обеспечения требуемой точности размеров и товарного вида инструмента после соединения корпуса с алмазоносным слоем осуществляют его окончательную чистовую обработку, а на рабочих чертежах заготовку корпуса изображают с необходимыми технологическими припусками. Величина припусков, форма корпуса и точность его размеров зависят от формы и размеров инструмента и выбранного технологического процесса изготовления. В табл. 34 приведены некоторые характерные формы сечения кругов, заготовки корпуса с необходимыми припусками и рекомендации по назначению соответствующих классов и степеней точности для выбора предельных отклонений от номинальных размеров и формы корпуса.

В процессе изготовления алмазного абразивного инструмента механической обработке подвергают также алмазоносный слой. При этом выполняют следующие операции: правку с целью устранения радиального и торцового биения алмазоносного слоя круга; вскрытие с целью обнажения алмазных зерен рабочих поверхностей; испытание на режущую способность с целью определения качества алмазоносного слоя. Выполнение этих операций связано с потерями алмазоносного слоя. Чтобы размеры алмазного абразивного инструмента после вышеуказанных операций не выходили за допустимые пределы, необходимо предусматривать припуски по алмазоносному слою (табл. 35). Припуск обеспечивают путем добавления в алмазоносную шихту связки. Незначительное уменьшение концентрации, которое при этом является неизбежным, как показали проведенные в Институте сверхтвердых материалов исследования, не оказывает влияния на работоспособность кругов. В табл. 36 приведены рекомендуемые технологические припуски на алмазоносный слой.

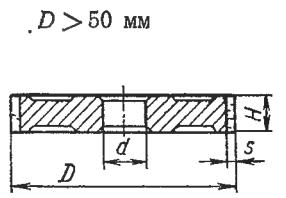
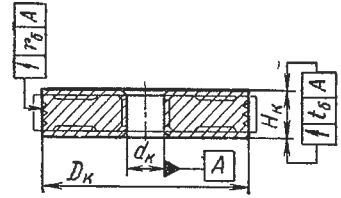
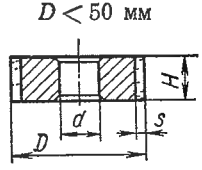
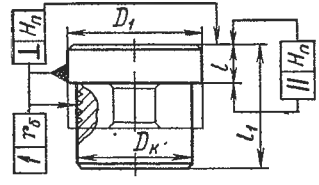
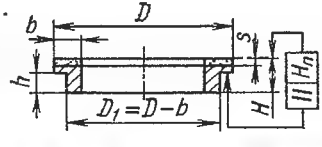
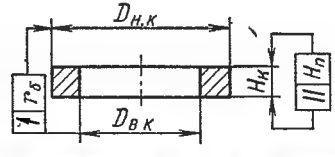
Соединение алмазоносного слоя с корпусом. Надежность соединения алмазоносного слоя с корпусом определяет качество и срок службы алмазного абразивного инструмента. Метод соединения выбирают в зависимости от марки связки алмазоносного слоя, формы и размеров инструмента, условий его эксплуатации.

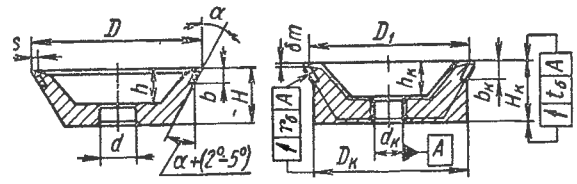
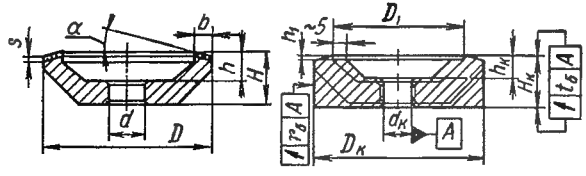
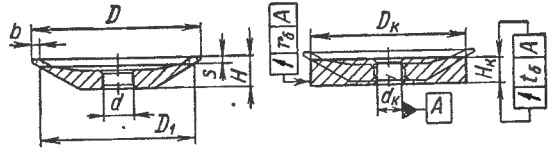
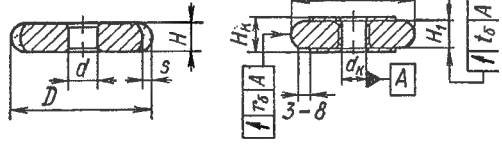
В настоящее время наиболее широкое применение получили следующие методы: диффузионное припекание, приклеивание, напрессовка, одновременное прессование и спекание, пайка, гальванический, механический.

Метод диффузионного припекания используют при изготовлении инструмента на металлических связках. При этом корпус предварительно подвергают меднению слоем толщиной 0,015 мм или лужению, а между корпусом и алмазоносным слоем, как правило, делают промежуточный безалмазный подслой толщиной до 0,5 мм. Кроме того, на поверхности корпуса, сопрягаемой с алмазоносным слоем, выполняют кольцевые (винтовые) канавки глубиной 0,2—0,3 мм, шагом 0,5—1 мм и углом профиля 60° или сетчатую накатку 0,6 по ОСТ 26017, а если ширина этой поверхности меньше 5 мм — поперечные пазы глубиной до 1,5 мм и шириной 1—3 мм.

Таблица 34

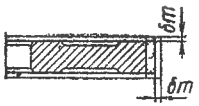
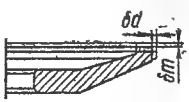
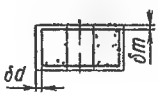
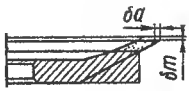
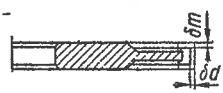
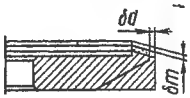
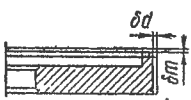
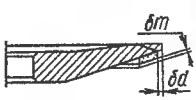
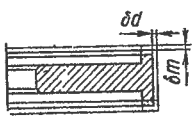
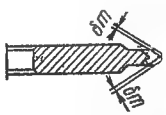
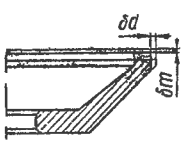
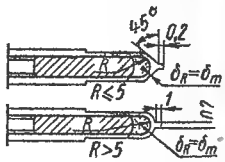
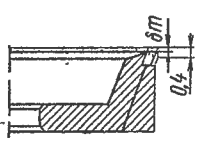
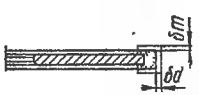
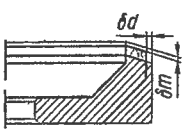
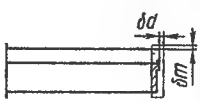
Рекомендации по расчету осиовиых размеров корпуса, выбору технологических припусков, точности формы и размеров

Обозначение инструмента	Связка	Форма инструмента	Форма корпуса	Размеры корпуса	Предельное отклонение
АПП	Металлическая	$D > 50$ мм 		$D_к = D - 2S$ $d_к = d - (2 \div 5)$ $H_к = H + (1 \div 3)$ $r_б$ $t_б$	X_3 (ОСТ 1013) A_3 (ОСТ 1013) C_4 (ОСТ 1014) VII степень (ГОСТ 10356—63) VIII степень (ГОСТ 10356—63)
		$D < 50$ мм 		$D_1 = D + \delta d$ $D_к = D - 2S$ $l = 5 \div 10$ $l_1 = l + (2 \div 3) \cdot H$ $r_б$ $H_п$	Д (ОСТ 1012) Д (ОСТ 1012) C_1 (ОСТ 1014) B_7 (ОСТ 1010) VII степень (ГОСТ 10356—63) VIII степень (ГОСТ 10356—63)
Кольца для изготовления кругов формы АЧК, АПВ и т. п.				$D_{н.к} = D + \delta d$ $D_{в.к} = D - 2b$ $H_к = H - S + (0{,}5 \div 1)$ $r_б$; $H_п$	Д (ОСТ 1012) A (ОСТ 1012) C_4 (ОСТ 1014) VII степень (ГОСТ 10356—63)

АТЧК и т. п.	Металлическая, органическая		$D_1 = D - 2S$ $D_к = D - 2(b_к - 0{,}4)\operatorname{tg}\alpha$ $d_к = d - (0 \div 2)$ $H_к = H + (0{,}5 \div 1)$ $h_к = h - (0{,}5 \div 1)$ $b_к = b + \delta m$ $t_б$; $r_б$	X_3 (ОСТ 1013) Д (ОСТ 1012) A_3 (ОСТ 1013) B_7 (ОСТ 1010) CM_7 (ОСТ 1010) A_4 (ОСТ 1014) VII степень (ГОСТ 10356—63)
А2ЧК, А3Т, АЧК и т. п.			$D_к = D + \delta d$ $D_1 = D - 2b$ $d_к = d - (0 \div 2)$ $H_к = H - S + (0{,}5 \div 1)$ $h_к = h - S - (0{,}5 \div 1)$ $h_1 < 2$ $t_б$; $r_б$	Д (ОСТ 1012) A (ОСТ 1012) A_3 (ОСТ 1013) C_4 (ОСТ 1014) CM_7 (ОСТ 1010) C_4 (ОСТ 1014) VII степень (ГОСТ 10356—63)
А1Т			$D_к = D_1$ $d_к = d - (0 \div 2)$ $H_к = H - S + (0{,}5 \div 1)$ $t_б$; $r_б$	Д (ОСТ 1012) A_3 (ОСТ 1013) C_4 (ОСТ 1014) VII степень (ГОСТ 10356—63)
А5П, А2П, А2ПП и т. п.	Металлическая		$D_к = D - 2S$ $H_1 = H$ $H_к = H + (1 \div 2)$ $d_к = d - (0 \div 5)$ $t_б$ $r_б$	X_3 (ОСТ 1013) A_4 (ОСТ 1014) B_7 (ОСТ 1010) A_3 (ОСТ 1013) VIII степень (ГОСТ 10356—63) VII степень (ГОСТ 10356—63)

Таблица

Схемы расположения припусков кругов различных форм

Наименование инструмента	Схема расположения припуска	Наименование инструмента	Схема расположения припуска
АПП		АТ	
А1ПП		А1Т	
А2ПП		А3Т	
АПВ		АЧТ	
АПВД		А2П	
АЧК		А5П	
А14К		АОК	
А2ЧК		АК	

Метод приклеивания алмазоносного слоя с корпусом получил широкое применение для инструмента на органических и керамических связках с торцовым расположением алмазоносного слоя (круги АЧК, АПВ, АПВД, АТ и т. п.). Для кругов на органической связке применяют в основном клей ВК 32-200, а для кругов на керамической связке — эпоксидную смолу ЭД-6 (ГОСТ 10587—72).

Таблица 36

Технологические припуски на алмазоносный слой

Наружный диаметр	Технологический припуск в мм		
	на торец для кругов работающих		на диаметр δd
	торцом	периферией	
До 100	0,15	0,05	0,10
100—250	0,20	0,10	0,15
Св. 250	0,25	0,15	0,20

Напрессовку алмазоносного слоя на корпус применяют для кругов на органической связке с алмазоносным слоем, расположенным по периферии (круги АПП, А2ПП, А2П, А5П) и по торцу с большим наружным диаметром (200—400 мм), небольшой шириной рабочей поверхности (3—5 мм) и толщиной алмазоносного слоя (1,5—2 мм). При этом на поверхности корпуса, сопрягаемой с алмазоносным слоем, выполняют канавки, а перед напрессовкой наносят равномерный слой клея ВК 32-200. Прочность клеевого соединения на сдвиг должна быть не менее 200 кгс/см^2.

Метод одновременного прессования и спекания (полимеризации) алмазоносного слоя и корпуса (переходного элемента) применяется при крупносерийном и массовом производстве шлифовальных кругов на органических связках, хонинговальных брусков и кругов формы АПП на керамических связках.

Метод пайки применяется для соединения алмазоносного слоя с корпусом инструмента на металлических связках в основном с прерывистым алмазоносным слоем (отрезные сегментные круги, полосовые пилы и т. п.). Пайка, как правило, осуществляется серебряным припоем марки ПСр 40 или ПСр50 (ГОСТ 8190—56).

Гальванический метод закрепления алмазных зерен с корпусом применяют при изготовлении многих инструментов. Он особенно эффективен в тех случаях, когда необходимо получить инструмент с тонким алмазоносным слоем, сложного фасонного профиля, мелких размеров, а обычные методы порошковой металлургии для изготовления алмазоносного слоя не могут быть использованы.

§ 2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ АЛМАЗНОГО АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

При изготовлении алмазного абразивного инструмента на органической, металлической и керамической связках, как правило, используют следующую технологию. Материалы, из которых изготовляют связку, измельчают и смешивают. Полученную шихту связки

смешивают с алмазным порошком, в результате чего образуется шихта алмазоносного слоя. Из шихты после формования и термической обработки получают алмазоносный слой заданной формы и размеров. Алмазоносный слой во время прессования и термической обработки или после завершения этих операций соединяют с корпусом и подвергают механической обработке для придания точных форм и размеров. Алмазный абразивный инструмент можно изготовлять и другими методами, например, с использованием технологии гальванотехники, переработки резиновых масс и т. д.

В производстве алмазного инструмента, выпускаемого небольшими сериями, как правило, используют универсальное оборудование. Специализация заводов на производстве однотипной продукции создает предпосылки для использования механизированного и автоматизированного оборудования, например, автоматических линий для изготовления инструментов на органической связке, туннельных печей с подвижным подом для инструментов на металлической связке и т. д.

Изготовление корпусов

Форма и размеры корпусов, материалы, из которых их изготовляют, припуски на механическую обработку после соединения с алмазоносным слоем определяются при конструировании инструмента. Точность изготовления корпусов должна быть высокой, как по эксплуатационным, так и по технологическим соображениям. В некоторых случаях, например при прессовании алмазоносного слоя головок АГЦ на органической связке, корпус является как бы одной из деталей пресс-формы, в которой прессуется шихта алмазоносного слоя. Поэтому точность размеров корпуса должна быть не ниже точности размеров других деталей пресс-формы. Если наружный диаметр корпуса выполнить неточно, то в зазор между ним и пуансоном будет выдавливаться прессуемый материал, что недопустимо. Кроме того, неточность взаимного расположения алмазоносного слоя и корпуса приводит к необходимости удаления большого объема алмазосодержащего материала при окончательной обработке алмазоносного слоя для обеспечения заданной точности инструмента.

При разработке технологии изготовления корпуса решаются следующие задачи: выбор заготовки и метода ее изготовления, определение базовых поверхностей и последовательности операций обработки для получения заданной формы и точности размеров, обеспечение условий для прочного соединения алмазоносного слоя с корпусом. Содержание технологического процесса во многом определяется материалом, из которого изготовляется корпус. Корпуса из алюминия и стали широко используют при изготовлении инструментов на всех связках. В качестве заготовок в этом случае используют сортовой и листовой прокат, поковки, точное литье и т. п. В некоторых случаях, например для корпусов отрезных сегментных кругов, выпускают специальные заготовки в виде тонких закаленных шлифованных дисков из легированной стали.

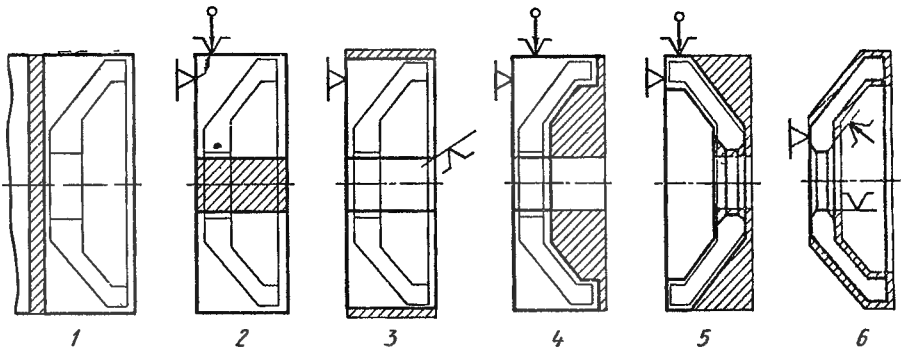


Рис. 70. Последовательность обработки корпуса круга АЧК на органической связке:

1 — отрезка заготовки; *2* — сверление отверстия; *3* — обтачивание наружной поверхности; *4* — обработка фасонной выемки корпуса; *5* — обработка торца и посадочного отверстия в размер; *6* — обработка корпуса на оправке в размер

Выбор технологии изготовления корпуса определяется во многом серийностью производства. Когда инструмент выпускают большими партиями, заготовки получают литьем или обработкой давлением. При выпуске инструментов в небольшом количестве в качестве заготовок целесообразно использовать прокат. Заготовки корпусов и переходных колец для придания им требуемой формы и точности обрабатывают на металлорежущих станках. Обработку разбивают на два этапа: черновую и чистовую. При черновой обработке для придания заготовке формы, близкой к окончательной, выбор технологических баз не играет большой роли, так как на обрабатываемых поверхностях предусматриваются припуски для чистовой обработки. При чистовой обработке требуется тщательный выбор базы. Например, при изготовлении корпусов кругов в качестве технологической базы выбирают поверхности посадочного отверстия и одного из торцов, которые обрабатывают с одной установки в размер. Всю дальнейшую обработку затем производят, базируясь на эти поверхности. При изготовлении корпусов головок АГЦ и подобных инструментов на торцах корпусов выполняют конусные поверхности, которые используют в качестве базовых для окончательной обработки. Эти же поверхности являются базовыми и при шлифовании алмазоносного слоя. Описанный принцип обработки позволяет получить точное взаимное расположение поверхностей корпусов относительно базовых. В качестве примера на рис. 70 показана последовательность основных операций при изготовлении корпусов из проката для кругов АЧК на органической связке.

При изготовлении корпусов широко применяют универсальные металлорежущие станки. В некоторых случаях, например, при изготовлении корпусов головок АГЦ могут быть использованы высокопроизводительные токарно-револьверные станки. С повышением серийности выпуска инструментов становится возможным использование специальных автоматических станков, в том числе с программным управлением.

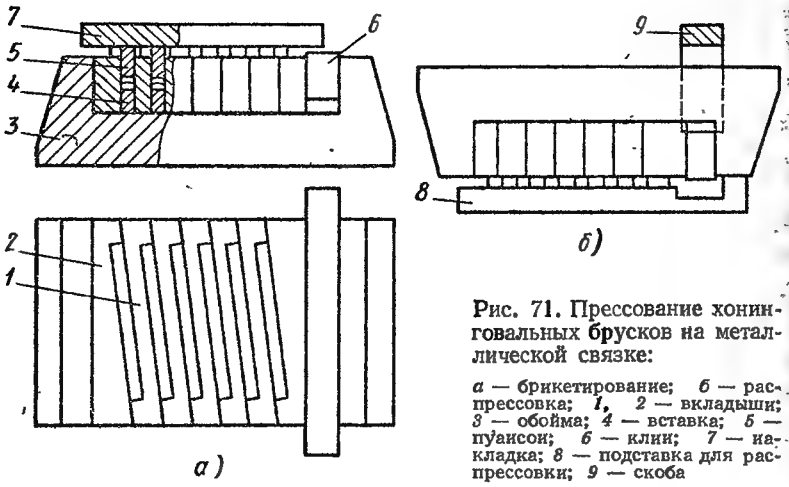


Рис. 71. Прессование хонинговальных брусков на металлической связке:

а — брикетирование; *б* — распрессовка; *1*, *2* — вкладыши; *3* — обойма; *4* — вставка; *5* — пуансон; *6* — клин; *7* — накладка; *8* — подставка для распрессовки; *9* — скоба

Повышение прочности закрепления на корпусе алмазоносного слоя достигается следующими приемами. Для инструментов на органических связках в тех случаях, когда алмазоносный слой напрессовывается на корпус, на поверхности соединения при токарной обработке выполняют неглубокие канавки. В некоторых случаях на поверхности корпуса может быть нанесена сетчатая накатка. При изготовлении инструментов на металлической связке для обеспечения прочного соединения алмазоносного слоя с переходным стальным кольцом или корпусом перед спеканием корпус или кольцо подвергают меднению. Слой гальванической меди толщиной 10—15 мкм наносят на подслой из никеля. Такое покрытие необходимо для защиты поверхности корпуса от окисления во время термической обработки при высокой температуре. Это создает наилучшие условия для прочного соединения слоя с корпусом в результате взаимодиффузии.

Прогрессивным методом изготовления металлических корпусов является метод порошковой металлургии. В этом случае корпус прессуют из металлического порошка и затем полученный брикет подвергают термической обработке для придания высокой прочности. Этот метод широко применяют при изготовлении хонинговальных брусков. Прессование корпуса и алмазоносного слоя брусков производится одновременно в одной пресс-форме (рис. 71), что значительно снижает трудоемкость изготовления инструментов. При изготовлении корпусов методом порошковой металлургии практически исключаются операции механической обработки. Однако широкое применение этого метода ограничивается размерами площади прессуемых изделий, которая должна быть не более 180—200 см^2. Это объясняется тем, что для уплотнения порошковой смеси необходимо давление 2000—3000 кгс/см^2. Нетрудно подсчитать, что для прессования изделий, площадь которых больше 200 см^2, тре-

буются мощные прессы усилием (4—6) 10^5 кгс. Как правило, на заводах алмазного инструмента такие прессы не используются.

Для изготовления корпусов кругов простой формы, ручек притиров, корпусов доводочных брусков используют пластмассы. Корпуса из пластмасс изготовляют прессованием в точных пресс-формах, что существенно сокращает объем механической обработки. Поэтому такой процесс изготовления корпусов наиболее приемлем при серийном производстве инструментов. Тем не менее он имеет ограниченное распространение, так как на существующих прессах могут быть изготовлены корпуса небольшого размера диаметром до 200 мм. Для прессования корпусов больших размеров требуются очень мощные прессы. Кроме того, корпуса из пластмасс склонны в процессе длительного хранения изменять форму в результате старения материала, что увеличивает биение рабочего слоя и приводит к повышенному расходу алмазов.

В основном в производстве алмазного инструмента используют термореактивные пластмассы АГ-4С и алюмобакелит. Материал АГ-4С применяют, например, для изготовления ручек притиров. Он поставляется в виде смотанной в рулон ленты из стеклоткани, пропитанной эпоксидной смолой. Для прессования эту ленту разрезают на куски и помещают в пресс-форму, в которой производят горячее прессование при давлении 500 кгс/см^2 и температуре 180° С. Если к корпусу из пластмассы АГ-4С прикрепляется алмазоносный слой на органической связке, то прессование заканчивают при температуре 130° С. Затем совместно с алмазоносным слоем производят прессование при указанных выше режимах. В результате горячего прессования материала АГ-4С получают высокопрочные корпуса.

На специализированных заводах, выпускающих алмазный абразивный инструмент на органических связках, для изготовления корпусов в некоторых случаях используют алюмобакелит: смесь 90% алюминиевого порошка и 10% связующего ПБ. Смесь получают в результате вальцевания с последующим измельчением. При горячем прессовании алюмобакелита получаются точные по форме и размерам заготовки корпуса, на которых производят механическую обработку посадочного отверстия и торцовой поверхности. Другие поверхности обработки не требуют. При изготовлении корпуса из алюмобакелита в некоторых случаях операции прессования корпуса и алмазоносного слоя могут выполняться одновременно в одной и той же пресс-форме (рис. 72).

Корпуса из керамических материалов используют при изготовлении кругов на керамической связке. Например, при изготовлении круга формы АПП корпус невозможно изготовить из другого материала в связи с хрупкостью и малой прочностью алмазоносного слоя, различием коэффициентов термического расширения. Поэтому корпус изготовляют из смеси частиц легкоплавкого стекла, электрокорунда и других керамических материалов. Прессование алмазоносного слоя и корпуса производят одновременно в одной пресс-форме. Это возможно в том случае, когда технологические режимы

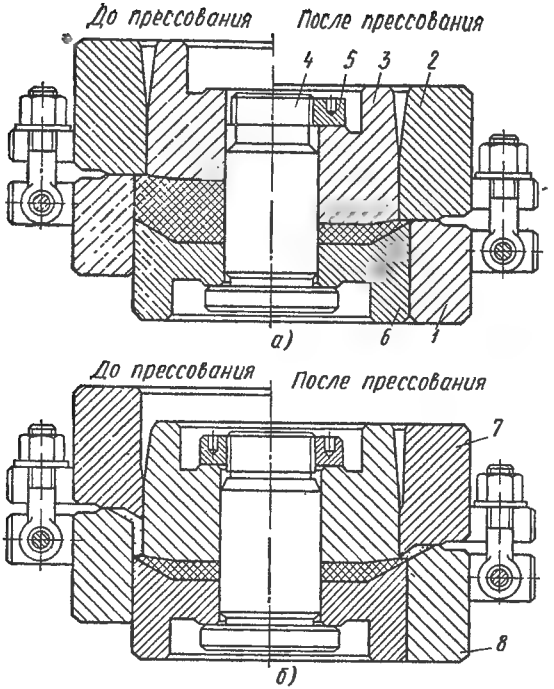


Рис. 72. Послойное прессование алмазоносного слоя кругов типа А1Т на органической связке:

а — прессование корпуса; *б* — напрессовка алмазоносного слоя; *1* — нижняя обойма для прессования корпуса; *2* — верхняя обойма для прессования корпуса; *3* — пуансон; *4* — палец; *5* — гайка; *6* — нижний пуансон; *7* — верхняя обойма для прессования алмазоносного слоя; *8* — нижняя обойма для прессования алмазоносного слоя

прессования и обжига алмазоносного слоя и корпуса, коэффициенты усадки и термического расширения одинаковы. При выполнении этих условий в результате прессования и обжига образуется прочный керамический материал, по периферии которого закреплен алмазоносный слой. Изготовленные корпуса подвергаются тщательному контролю. Как правило, проверяют точность форм и размеров и соответствие их величинам, предусмотренным в чертежах.

Изготовление инотрумента на органической связке

При изготовлении жестких и эластичных алмазных абразивных инструментов в качестве жестких связок широко применяют фенолформальдегидные смолы, в качестве эластичных — многокомпонентные смеси на основе вулканизированного каучука. В жестких связках зерна алмазов по отношению к связующему могут рассматриваться в качестве вещества, изменение крупности и количества которого приводит к существенному изменению свойств композиции. Чтобы стабилизировать свойства алмазоносного слоя при изменении концентрации алмазов и их зернистости, в состав органических связок вводят наполнители. Количество наполнителя при изменении концентрации алмазов меняют так, чтобы соотношение объемов связующего и наполняющих материалов оставалось неизменным. Материал, из которого изготовляют наполнитель, существенно влияет на физико-механические свойства алмазоносного слоя: прочность удержания алмазов, износостойкость, прочность, теплостойкость и др. При изготовлении инструмента на органических жестких и эластичных связках на специализированных заводах используют то же оборудование и оснастку, что и при переработке подобных пластмасс и каучука.

Изготовление инструмента на жестких связках. Технологический процесс изготовления инструмента на жестких органических связках включает операции изготовления корпуса, приготовления смеси порошка связки и алмазов (шихты алмазоносного слоя), горячего прессования и термической обработки слоя, соединения его с корпусом, окончательной обработки, контроля качества и упаковки (рис. 73).

Применяемые материалы. В качестве связующего, закрепляющего в алмазоносном слое частицы наполнителя и алмаза,

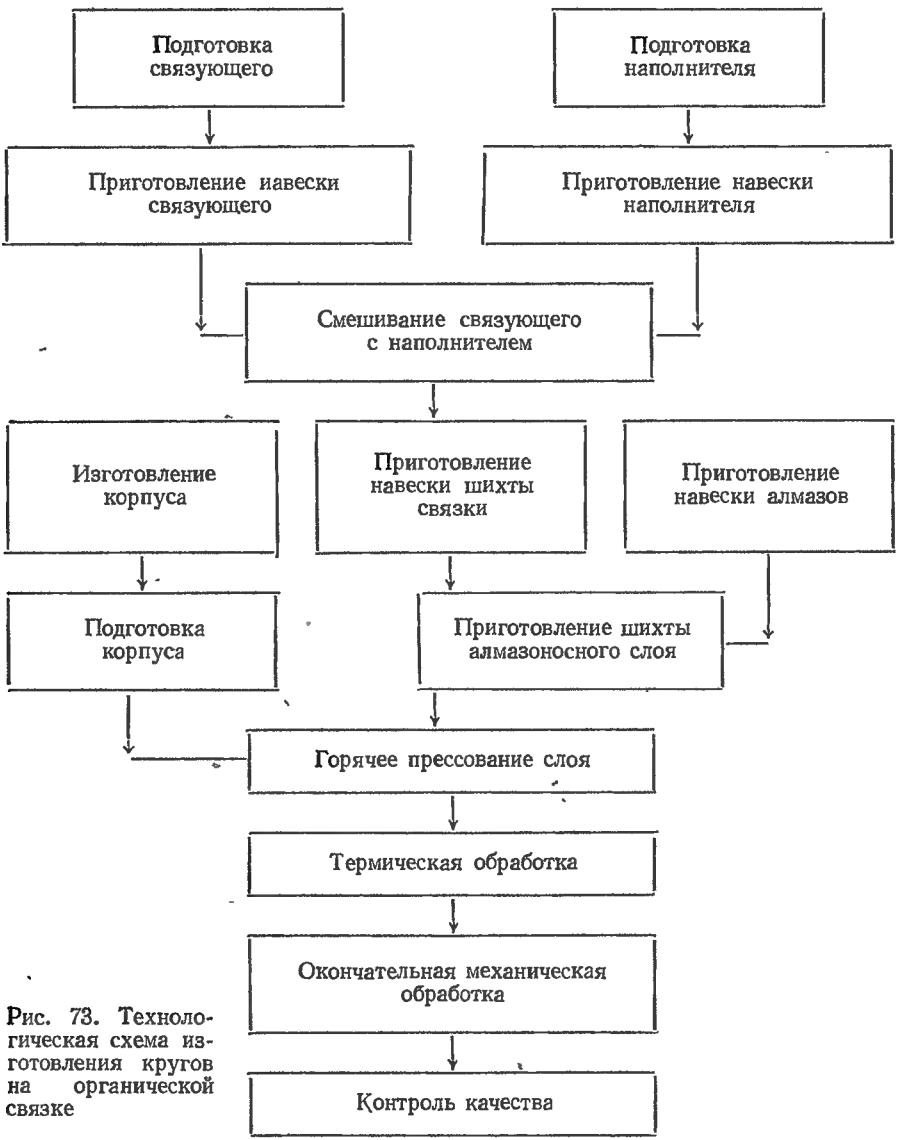


Рис. 73. Технологическая схема изготовления кругов на органической связке

широко применяют смесь фенольформальдегидной смолы с отвердителем. Для этих целей пригодно связующее ПБ, которое используют при изготовлении абразивных кругов. Связующее ПБ имеет много достоинств — высокую износостойкость, влагостойкость, простоту совмещения с другими порошковыми компонентами, низкие параметры переработки — давление и температуру. Для изготовления алмазоносного слоя наиболее пригодно связующее с повышенным (не ниже 7%) содержанием отвердителя — уротропина. В качестве связующего могут быть использованы также и другие смолы и полимерные материалы. Характеристики материалов, используемых как наполнители в алмазоносном слое на органической связке, приводятся в табл. 37. Для изготовления корпусов применяют алю

Таблица 37

Материалы, применяемые в качестве наполнителей при изготовлении инструментов на органической связке

Связка	Наполнитель	Зерновой состав	Плотность в г/см³
Б1	Карбид бора	По ГОСТ 3647—71	2,5
Б2	Железный порошок ПЖ1—ПЖ5 ГОСТ 9849—61 . . .	С, М и ОМ по ГОСТ 9849—61	7,8
Б3	Электрокорунд	М40—М5 по ГОСТ 3647—71	3,9
Б4	Зеленый карбид кремния . .	М40—М5 по ГОСТ 3647—71	3,2
БР	Резиновая мука	—	1,2

миниевый и стальной прокат, а также алюмобакелит. В качестве вспомогательных материалов применяют ткани и марлю для протирки пресс-форм; этиловый спирт, ацетон и бензин для промывки и обезжиривания поверхностей (например, перед склейкой); смазочный материал Ц221 для смазки поверхности пресс-форм, с целью предотвращения налипания связки на детали; порошки абразивных материалов для притирки плоскостей алмазоносного слоя и корпуса перед склейкой; кальку для пакетов, в которых хранятся навески шихты алмазоносного слоя, и другие.

Составы органических связок. На основе связующего ПБ приготовляют различные связки. Широко распространена связка Б1, состоящая из смеси связующего ПБ и порошка карбида бора. Частицы карбида бора, прочно закрепленные в рабочем слое, увеличивают жесткость материала связки, улучшают процесс самозатачивания инструмента при шлифовании. Зернистость карбида бора и количество его изменяются в зависимости от зернистости и концентрации алмазов. На связке Б1 изготовляются круги для шлифования и заточки твердых сплавов. Профильные инструменты, например круги формы А5П, А2П, изготовляют с использованием связки Б2, в состав которой входит железный порошок. Частицы железного порошка образуют каркас, повышающий теплопроводность алмазоносного слоя. Быстрый отвод тепла препятствует перегреву и разрушению поверхности алмазоносного слоя, что снижает

расход алмазов при обработке и увеличивает стойкость профиля. В состав связок Б3, Б4 и БР, применяемых для чистового и доводочного шлифования металлов, вводят соответственно микропорошки электрокорунда, зеленого карбида кремния и резиновой муки. Круги из металлизированных алмазов на новой связке Б8 при заточке твердосплавного инструмента обеспечивают бо́льшую производительность, чем круги на связке Б1.

Расчет весового содержания компонентов шихты связки. Количество связки, необходимое для изготовления инструмента,

$$G_{св} = V_{св}\gamma_{св}K_{п},$$

где $V_{св}$ — объем связки в см³;

$\gamma_{св}$ — плотность связки в г/см³;

$K_{п}$ — коэффициент потерь, равный 1,05—1,15.

В формуле два неизвестных: объем связки $V_{св}$ и плотность $\gamma_{св}$. Объем, занимаемый связкой, определяется объемом алмазоносного слоя, концентрацией алмазов и пористостью. Для инструментов, изготовленных методом горячего прессования, с беспористым алмазоносным слоем из неметаллизированных алмазов

$$V_{св} = V\left(1 - \frac{0{,}25K}{100}\right) \text{ см}^3,$$

где V — объем алмазоносного слоя в см³;

K — концентрация алмазов в %.

Формула справедлива для любого состава связки, так как объем, занимаемый алмазами без покрытия, зависит только от их концентрации. Плотность связки $\gamma_{св}$ можно рассчитать по известному весовому или объемному соотношению компонентов. Как правило, рецептура алмазоносного слоя органических связок задается объемным соотношением связующего, наполнителя и алмазов. Как уже указывалось, чтобы стабилизировать свойства алмазоносного слоя, зачастую принимают постоянным объем, занимаемый связующим. Тогда суммарный объем наполнителя и алмазов в беспористом алмазоносном слое будет также постоянным. При изменении концентрации алмазов в этом случае меняется объем наполнителя. В качестве примера в табл. 38 показаны объем неметаллизированных алмазов, наполнителя и связующего, для связок Б1, Б2 и т. п. Из табл. 38 видно, что объемное соотношение компонентов связки для каждой концентрации будет другим, вследствие чего будет меняться и весовое соотношение компонентов, и плотность связки, которую можно подсчитать следующим образом. Обозначим для по-

Таблица 38

Содержание алмазов, наполнителя и связующего в алмазоносном слое

Концентрация алмазов в %	Объем в % (связующего 50%)	
	алмазов	наполнителя
50	12,5	37,5
100	25	25
150	37,5	12,5
200	50	—

следующих расчетов объем, который занимает связующее в 1 см³ алмазоносного слоя v_1, объем наполнителя v_2, плотность связующего γ_1, плотность наполнителя γ_2. Для определения плотности связки $\gamma_{св}$ найдем объем и массу связки в 1 см³ алмазоносного слоя. Как было показано ранее, объем, занимаемый алмазами в 1 см³ алмазоносного слоя, зависит только от концентрации и составляет

$$v_а = 0{,}25\,\frac{K}{100}.$$

Тогда для беспористых связок при использовании неметаллизированных алмазов объем связки в 1 см³ алмазоносного слоя

$$v_{св} = v_1 + v_2 = 1 - 0{,}25\,\frac{K}{100}.$$

Масса связки $g_{св}$ рассчитывается как сумма массы связующего g_1, равной произведению плотности γ_1 на объем v_1, и массы наполнителя g_2, равной произведению плотности γ_2 на объем v_2. Следовательно, масса связки, содержащейся в 1 см³ алмазоносного слоя,

$$g_{св} = g_1 + g_2 = v_1\gamma_1 + v_2\gamma_2.$$

Зная массу связки $g_{св}$ и ее объем $v_{св}$, определяем плотность как частное от деления массы на объем:

$$\gamma_{св} = \frac{g_{св}}{v_{св}} = \frac{v_1\gamma_1 + v_2\gamma_2}{v_1 + v_2} = \frac{v_1\gamma_1 + v_2\gamma_2}{1 - 0{,}25\,\frac{K}{100}}.$$

По известным $V_{св}$ и $\gamma_{св}$ определяем массу связки для изготовления инструмента с объемом алмазоносного слоя V:

$$G_{св} = V_{св}\gamma_{св}K_п = V\left(1 - 0{,}25\,\frac{K}{100}\right)\cdot\frac{v_1\gamma_1 + v_2\gamma_2}{1 - 0{,}25\,\frac{K}{100}}\cdot K_п = V(v_1\gamma_1 + v_2\gamma_2)\cdot K_п.$$

Эта формула справедлива во всех случаях, когда соотношение компонентов алмазоносного слоя задано в объемных долях.

Преобразуем выведенную формулу. Из соотношения

$$v_1 + v_2 = 1 - 0{,}25\,\frac{K}{100}$$

следует, что объем наполнителя v_2 при различной концентрации

$$v_2 = 1 - v_1 - 0{,}25\,\frac{K}{100}.$$

Тогда масса связки

$$G_{св} = V\left[v_1\gamma_1 + \left(1 - v_1 - 0{,}25\,\frac{K}{100}\right)\gamma_2\right]K_п.$$

Таким образом, по известному объему связующего v_1 в 1 см³ алмазоносного слоя, заданной плотности связующего γ_1 и плотности наполнителя γ_2 может быть определена масса связки для изготовле-

ния алмазоносного слоя объемом V из неметаллизированных алмазов при любой их концентрации.

В случае использования металлизированных алмазов объем связки $v_{св}$ уменьшается на величину v_3, соответствующую объему, который занимает материал покрытия порошка. Чтобы сохранить при этом постоянный объем связующего v_1, уменьшают объем наполнителя v_2 так, что

$$v_2^м = 1 - v_1 - 0{,}25\frac{K}{100} - v_3.$$

Объем v_3 находится следующим образом. Масса покрытия по отношению к массе алмазов задается, как правило, в процентах. Обозначим эту величину q_3. Тогда, учитывая, что в 1 см^3 алмазоносного слоя содержится $4{,}4 \cdot \frac{0{,}2 \cdot K}{100}$ г алмазов, масса покрытия

$$g_3 = 4{,}4 \cdot 0{,}2\frac{K}{100} \cdot \frac{q_3}{100}.$$

Объем v_3, занимаемый в 1 см^3 алмазоносного слоя покрытием, при плотности материала покрытия γ_3 определяется по формуле

$$v_3 = \frac{g_3}{\gamma_3} = \frac{4{,}4 \cdot 0{,}2\frac{K}{100} \cdot \frac{q_3}{100}}{\gamma_3} = \frac{8{,}8Kq_3}{\gamma_3} \cdot 10^{-5}.$$

Подставляя значение v_3 в формулу для определения объема наполнителя $v_2^м$, получим

$$v_2^м = 1 - v_1 - 0{,}25\frac{K}{100} - v_3 = 1 - v_1 - 0{,}25\frac{K}{100} - \frac{8{,}8Kq_3}{\gamma_3} \cdot 10^{-5}.$$

Масса связки в 1 см^3 алмазоносного слоя при использовании металлизированных алмазов

$$g_{св}^м = v_1\gamma_1 + v_2^м\gamma_2 = v_1\gamma_1 + \left(1 - v_1 - 0{,}25\frac{K}{100} - \frac{8{,}8Kq_3}{\gamma_3} \cdot 10^{-5}\right)\gamma_2.$$

Объем связки в 1 см^3 алмазоносного слоя с металлизированными алмазами

$$v_{св}^м = 1 - 0{,}25\frac{K}{100} - v_3 = 1 - 0{,}25\frac{K}{100} - \frac{8{,}8Kq_3}{\gamma_3} \cdot 10^{-5}.$$

Плотность связки

$$\gamma_{св}^м = \frac{g_{св}^м}{v_{св}^м} = \frac{v_1\gamma_1 + \left(1 - v_1 - 0{,}25\frac{K}{100} - \frac{8{,}8Kq_3}{\gamma_3} \cdot 10^{-5}\right)\gamma_2}{1 - 0{,}25\frac{K}{100} - \frac{8{,}8Kq_3}{\gamma_3} \cdot 10^{-5}}.$$

Подставляя полученное значение $\gamma_{св}^{м}$ в формулу для подсчета массы связки $G_{св}^{м}$, определяем

$$G_{св}^{м} = V\left(1 - 0{,}25\frac{K}{100} - \frac{8{,}8Kq_3}{\gamma_3}\cdot 10^{-5}\right)\gamma_{св}^{м}K_{п} = V\left[v_1\gamma_1 + \right.$$

$$\left. + \left(1 - v_1 - 0{,}25\frac{K}{100} - \frac{8{,}8Kq_3}{\gamma_3}\cdot 10^{-5}\right)\gamma_2\right]K_{п}.$$

В том случае, когда на алмазоносном слое предусматривается припуск на окончательную обработку, к количеству связки, идущей на приготовление шихты алмазоносного слоя, добавляют навеску связки, подсчитанную по формуле

$$G_{св}^{пр} = \gamma_{св}V_{пр},$$

где $V_{пр}$ — объем припуска.

Такой прием позволяет обеспечить требуемый размер алмазоносного слоя, не изменяя расчетного количества алмазов.

Для практических расчетов удобно пользоваться весовым соотношением компонентов в шихте связки. Процентное весовое содержание связующего q_1 и наполнителя q_2 в шихте связки определяется по следующим формулам:

для неметаллизированных алмазов

$$q_1 = \frac{v_1\gamma_1}{v_1\gamma_1 + v_2\gamma_2}\cdot 100\%,$$

$$q_2 = \frac{v_2\gamma_2}{v_1\gamma_1 + v_2\gamma_2}\cdot 100\%;$$

для металлизированных

$$q_1^{м} = \frac{v_1\gamma_1}{v_1\gamma_1 + v_2^{м}\gamma_2},$$

$$q_2^{м} = \frac{v_2^{м}\gamma_2}{v_1\gamma_1 + v_2^{м}\gamma_2}.$$

Подставляя в эти формулы значения v_2 и $v_2^{м}$, вычисленные, как показано ранее, можно определить процентное содержание компонентов для любых значений v_1, γ_1, γ_2, q_3, γ_3 и K.

Приготовление шихты алмазоносного слоя. В соответствии с расчетом приготовляют навеску шихты связки и алмазов и смешивают их для получения шихты алмазоносного слоя. Основная цель этого этапа — приготовление навесок однородной и сыпучей смеси шихты связки с равномерно распределенными по всему объему частицами алмазов. Так как в состав жестких органических связок входит наполнитель, количество которого изменяется в зависимости от концентрации, а зерновой состав — от зернистости алмазов, номенклатура составов шихты связок велика. В новой связке Б8 зерновой состав наполнителя не зависит от зернистости

алмазов, что упрощает процесс приготовления шихты связки . В промышленном производстве инструмента на органической связке шихту связки приготовляют на партию инструмента и используют затем по мере необходимости.

Приготовление шихты связки включает операции подготовки, дозирования и смешивания компонентов. Качество исходных компонентов контролируют на соответствие требованиям технических условий или стандартов на поставляемый материал. Связующее и порошки наполнителя тщательно сушат в сушильном шкафу при температуре 25—30° С до тех пор, пока влаги останется не более 0,5%. Большее содержание влаги приводит к образованию пузырей и вздутий на поверхности инструмента. Для удаления комков и посторонних примесей связующее ПБ просеивают через сито с размером ячеек 80—100 мкм. Наполнители просеивают так, чтобы размер зерен был меньше зернистости алмазного порошка. При использовании в качестве наполнителей абразивных материалов в зерне подбирают соответствующую зернистость. В этом случае просеивание не производят. Применяемые для приготовления шихты связки Б1 порошки карбида бора подвергают обогащению и химической очистке. Обогащение заключается в отмывке порошка в слабо концентрированной серной кислоте с целью удаления свободного графита. Химическая очистка полученного продукта смесью концентрированной серной кислоты с хромпиком производится для удаления из порошка окислов бора. После подготовки компоненты шихты связки развешивают в соответствии с рецептурой, засыпают в барабан и смешивают в течение 5—7 ч. Коэффициент заполнения объема барабана смесителя составляет 0,3—0,4, частота вращения 30—40 об/мин. По окончании смешивания смесь выгружают из барабана и после контроля однородности упаковывают в непрозрачную тару с плотно закрывающейся крышкой. Это предотвращает окисление связующего, разложение его под воздействием света и поглощение влаги. Приготовленная шихта должна иметь хорошую сыпучесть, быть однородной по составу. Для проверки качества шихты связки изготавливают контрольные образцы путем горячего прессования и определяют твердость, предел прочности и удельную ударную вязкость. Контрольные величины проверяемых показателей предусмотрены в технических условиях на связку. Шихта связки может храниться в герметичной таре, в условиях, исключающих повышение влажности, до 14 суток.

Для приготовления шихты алмазоносного слоя отвешивают необходимое количество шихты связки на технических весах с точностью до 0,1 г, алмазов — на аналитических с точностью до 0,1 мг. При серийном производстве навески приготовляют на партию инструмента с одинаковой характеристикой алмазоносного слоя, при единичном — на одну штуку. Количество алмазов без покрытия определяют по известному объему алмазоносного слоя V и заданной концентрации K:

$$G_a = 4{,}4\,\frac{K}{100}\cdot V0{,}2.$$

Когда используются алмазы с покрытием, то их масса

$$G_a^м = 4{,}4\,\frac{K}{100}\cdot V0{,}2\left(1+\frac{q_з}{100}\right).$$

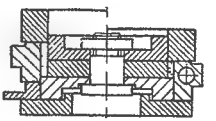
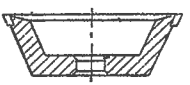
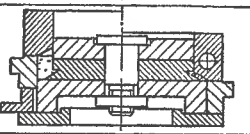
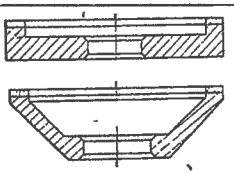
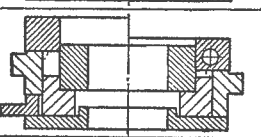
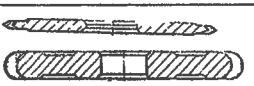
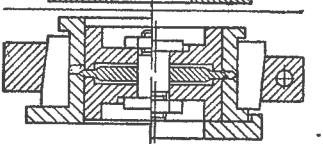
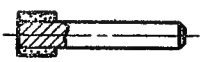
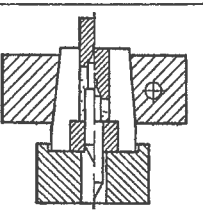
Смешивание шихты связки и алмазов производят без увлажнителя. Если навеска шихты связки превышает 0,5 кг, то ее смешивают с алмазами в барабанном смесителе не менее 3 ч. При меньшей навеске шихту связки и алмазы смешивают вручную в течение 10—15 мин. Шихту, приготовленную с использованием микропорошков алмаза, трижды протирают через сито с размером ячеек 160 мкм, чтобы разбить слипающиеся частицы алмаза. Для каждой зернистости микропорошка применяют отдельное сито. Срок хранения готовой шихты алмазоносного слоя не должен превышать двух суток. Следует предохранять шихту от вибраций, ударов, потряхиваний, так как при этом нарушается равномерное распределение частиц алмазов и других компонентов шихты из-за большой разницы в плотности компонентов.

Горячее прессование в пресс-формах обеспечивает высокую плотность алмазоносного слоя, прочное удержание алмазов в связке, большую точность геометрической формы и размеров. Алмазоносный слой инструмента на жестких органических связках прессуют на гидравлических прессах с подогревными плитами. Технологические режимы прессования — давление, температура нагрева и время изотермической выдержки — оказывают большое влияние на качество инструмента. При использовании связующего ПБ высокое качество алмазоносного слоя достигается при соблюдении таких режимов: давление прессования 300—500 кгс/см^2, температура нагрева 180° ± 10°, время выдержки при термической обработке на прессе не менее 7 мин на 1 мм толщины рабочего слоя. Алмазоносный слой инструмента прессуют в пресс-формах закрытого типа (табл. 39). Конструкции пресс-форм, как правило, предусматривают прессование «до упора». Детали пресс-форм изготовляют из малоуглеродистой стали с последующей цементацией, закалкой и хромированием рабочих поверхностей. Чтобы увеличить срок службы пресс-форм, предотвратить прилипание алмазоносного слоя к деталям, их формующие поверхности обрабатывают до 9—10-го класса шероховатости. Качественное изготовление алмазоносного слоя возможно только при обеспечении зазоров в соединениях пресс-форм не более 0,02 мм. При больших зазорах из-за утечки связующего нельзя достичь заданной плотности.

Этап прессования включает следующие операции: сборку и смазку пресс-форм, засыпку шихты алмазоносного слоя в полость пресс-формы, горячее прессование на гидравлических прессах, охлаждение и разборку пресс-формы и извлечение алмазоносного слоя. При сборке детали пресс-форм покрывают тонким слоем теплостойкой смазки. Смазку наносят на очищенные от загрязнений, промытые ацетоном и тщательно высушенные формующие поверхности. Наличие слоя смазки облегчает процесс прессования и препятствует прилипанию алмазоносного слоя к деталям пресс-форм. Объем

Таблица 39

Типовые пресс-формы для изготовления инструмента на органической связке

Форма инструмента	Пресс-формы: Начало прессования	Пресс-формы: Конец прессования	Назначение — инструмент
			АПП
			А1ЧК, А4Т
			АПВ, АПВД, А4К, АТ
			А2П, А5П
			АГЦ

шихты алмазоносного слоя в неспрессованном состоянии в 3—4 раза больше объема алмазоносного слоя. Поэтому объем загрузочной камеры пресс-формы, куда засыпают шихту, должен быть во столько же раз больше. При формовании алмазоносного слоя цилиндрической формы высота камеры превышает конечную высоту алмазоносного слоя в 3—4 раза.

Засыпка и разравнивание шихты алмазоносного слоя в полости пресс-формы производится вручную. Тщательное разравнивание обеспечивает равномерную плотность и твердость алмазоносного слоя. При засыпке и разравнивании шихты используют вращающиеся столики. После засыпки и разравнивания шихты, а также сборки пресс-формы выполняют горячее прессование на гидравлическом прессе. Для нагрева пресс-форм пресс должен быть оборудован подогревными плитами. Так как в процессе горячего прессования

выделяется большое количество газов, на оборудовании должны быть предусмотрены вытяжные устройства. Поверхности плит пресса шлифуют и выставляют так, чтобы параллельность их была в пределах ±0,05 мм на длине 100 мм. Это обеспечивает равную толщину алмазоносного слоя после прессования. Пресс-форму устанавливают на плиту пресса и при опускании верхней плиты к пуансону прикладывают силу, равную 40—50% от полной расчетной силы прессования. Расчетная сила прессования

$$P = (1{,}3 \div 1{,}5)\, pF,$$

где p — давление брикетирования в кгс/см^2;

F — площадь проекции поверхности прессования на плоскость, перпендикулярную к направлению прессования, в см^2;

1,3—1,5 — коэффициент, компенсирующий погрешности измерения давления.

От плит пресса пресс-форма нагревается до 100° С, после чего силу, приложенную к пуансону, увеличивают до расчетной и нагревают пресс-форму до 180° С. Температуру нагрева контролируют термометром или термопарой. С момента достижения заданной температуры нагрева отсчитывают время изотермической выдержки термической обработки из расчета 7 мин на 1 мм толщины прессуемого рабочего слоя. Как было показано ранее, при нагреве связующего ПБ в интервале температур 50—100° С оно размягчается и затем отвердевает при температуре 140—180° С. Приложение в процессе нагрева давления способствует получению беспористого слоя, так как из объема алмазоносного слоя удаляются газы. Изотермическая выдержка при максимальной температуре нагрева необходима для того, чтобы обеспечить завершение процессов поликонденсации связующего ПБ.

Прессование алмазоносного слоя в две стадии выполняют по следующим причинам. Как известно, вязкость связующего ПБ при нагреве до 115° С резко уменьшается. При взаимодействии с отвердителем в этом же интервале температур активно образуются газы. Поэтому меньшее давление прессования на первой стадии обеспечивает лучшие условия для удаления газов, что предотвращает образование пор и пузырей. Помимо этого, приложение полного давления прессования после разжижения смолы и уплотнения ее при малом давлении уменьшает передрабливание хрупких частиц алмазов АСО. После изотермической выдержки пресс-форму снимают с пресса, охлаждают в воздушном охладителе и распрессовывают. При извлечении алмазоносного слоя, изготовленного из микропорошков алмаза, температура пресс-формы должна быть в пределах 100—120° С. При более низкой температуре из-за хрупкости брикетов могут образоваться трещины. При изготовлении остальных инструментов распрессовка производится при нормальной температуре.

Процесс горячего прессования включает большое количество операций, связанных с перемещениями пресс-формы, их установкой и т. д. Это требует значительных затрат ручного труда. В настоящее

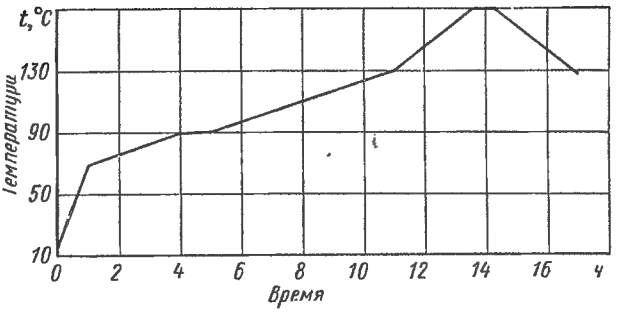


Рис. 74. Режим нагрева и охлаждения алмазоносного слоя при раздельной термической обработке

время разработана и изготовлена поточная полуавтоматическая линия, на которой осуществляются все этапы горячего прессования после загрузки шихты алмазоносного слоя в камеру пресс-форм и установки пуансона. На Томилинском заводе алмазного инструмента один из гидравлических прессов модернизирован так, что на нем одновременно размещаются пресс-формы в несколько этажей. Для этого на прессе установлены промежуточные нагревательные плиты и рычажная система их перемещения. Такая модернизация во много раз повысила производительность пресса.

Если термическая обработка алмазоносного слоя для стабилизации свойств выполняется на гидравлическом прессе, то значительную часть времени он используется непроизводительно для поддержания температуры пресс-форм при изотермической выдержке. Потери достигают 40% всего времени работы пресса. Поэтому при серийном изготовлении инструментов применяют технологию, предусматривающую раздельное выполнение операций прессования на гидравлических прессах и термическую обработку в электропечах. В процессе длительного нагрева в электропечи при тщательно контролируемом температурном режиме полностью завершается поликонденсация связующего, что способствует повышению качества алмазоносного слоя. При раздельной термической обработке повышается коэффициент использования прессов, вследствие того, что они применяются только во время горячего прессования, ускоряется оборот пресс-формы, так как термическая обработка производится в свободном состоянии.

Алмазоносный слой прессуют в два этапа так, как описано ранее, заканчивая операцию при температуре 160° С без изотермической выдержки. Затем пресс-форму охлаждают и разбирают. Для придания алмазоносному слою соответствующих физико-механических свойств термическая обработка производится в специальных низкотемпературных электропечах. Одновременно в печь загружают партию инструментов и производят нагрев, выдержку и охлаждение по режиму, показанному на рис. 74. Медленное охлаждение изделий производят вместе с печью.

Из опыта изготовления абразивных кругов на бакелитовой связке известно, что в процессе нагрева при бакелизации с поверхности инструмента испаряются и выгорают фенолформальдегидные смолы,

что ухудшает их свойства. Термическая обработка инструмента на органической связке без доступа кислорода в специальной газовой защитной среде при повышенной температуре может способствовать повышению качества инструмента. Однако для такой обработки требуется более сложное оборудование.

После термической обработки производят окончательную механическую обработку и испытания инструмента.

Контроль качества алмазоносного слоя включает: осмотр инструмента для выявления трещин, сколов, пористости, пузырей и вздутий; проверку геометрических размеров слоя; определение твердости и величины торцового и радиального биения. При наличии дефектов или отклонений размеров от чертежных инструменты бракуют и передают на рекуперацию. При проверке качества руководствуются требованиями технических условий на инструмент.

Брак по трещинам и сколам алмазоносного слоя, как правило, является следствием неправильного выполнения операции прессования, некачественного изготовления пресс-форм, наличия на формующей поверхности забоин и глубоких царапин. Для предотвращения такого брака следует тщательно контролировать состояние деталей пресс-форм, бережно и аккуратно обращаться с ними, применять при разборке медные молотки, не использовать стальные скребки при очистке поверхности формующих полостей. Большая навеска шихты алмазоносного слоя по сравнению с расчетной может также быть причиной появления трещин. Особую осторожность надо соблюдать при прессовании инструментов из микропорошков алмаза, имеющих пониженную прочность и склонность к трещинообразованию.

Из-за утечки связующего через зазоры в подвижных соединениях пресс-форм алмазоносный слой может оказаться пористым. Поэтому перед сборкой тщательно контролируют размеры деталей пресс-форм и определяют зазоры. Нормальные зазоры восстанавливают путем размерного хромирования поверхностей деталей. Пористость алмазоносного слоя может быть также следствием заниженной навески шихты алмазоносного слоя против расчетной, неправильного выбора высоты ограничителей при прессовании до упора. Пузыри и вздутия на алмазоносном слое появляются из-за избытка влаги в шихте, завышения давления в первой стадии прессования. Чтобы предотвратить эти дефекты, компоненты необходимо хранить в герметичной таре, применять их для приготовления шихты связки после сушки, точно выдерживать давление при прессовании. Неточности геометрических размеров и формы алмазоносного слоя могут быть следствием неправильной сборки пресс-форм, некачественного разравнивания шихты, перекосов при прессовании, неточной установки плит пресса, некачественного изготовления деталей пресс-формы и их износа. Для предотвращения брака необходимо следить за состоянием оборудования, оснастки и тщательно выполнять сборку пресс-формы, засыпку и разравнивание шихты алмазоносного слоя и горячее прессование.

Твердость алмазоносного слоя является комплексной характеристикой качества выполнения операций технологического про-

цесса — смешивания, разравнивания, горячего прессования, термической обработки. Для измерения твердости используют приборы типа ТКН-2. В качестве наконечника применяют стальной шарик диаметром 5 мм, который вдавливают в слой с силой 60 кгс. Твердость оценивается по глубине отпечатка и определяется в условных единицах по показаниям стрелочного индикатора прибора ТКН-2. Показания считывают со шкалы В. Твердость определяют как среднее арифметическое нескольких (три—пять) отдельных измерений. Твердость независимо от марки и зернистости алмазов должна быть не ниже предусмотренной техническими условиями. Например, для связки Б1 твердость должна быть не менее 105 единиц, связки БР—80 единиц, связки Б8—100 единиц и т. д.

Изготовление инструмента на эластичных связках включает операции приготовления связки, смешивания алмазов со связкой, вырезки заготовок, вулканизации их с одновременным прикреплением к основе (рис. 75). В отличие от изготовления инструментов на вулканитовой связке здесь вулканизация алмазоносного слоя производится в пресс-форме под давлением, что обеспечивает высокую точность инструмента и позволяет создать при необходимости на поверхности алмазоносного слоя рельеф в виде чередующихся выступов и впадин. Для приготовления каучукосодержащей связки используют смеси синтетического бутадиен-нитрильного каучука, совмещенного с поливинилхлоридной смолой, с добавками вулканизирующих агентов, наполнителей, ускорителей вулканизации и мягчителей. В качестве этих компонентов в основном применяют те же вещества и в тех же примерно количествах, что и при изготовлении вулканитовых кругов. Особенностью эластичных связок алмазоносного инструмента по сравнению с вулканитовыми является применение каучука, совмещенного с поливинилхлоридной смолой, например игелитом, и связующим ПБ. Полученные на такой основе материалы превосходят чистый каучук по прочности, сопротивлению истиранию и пластичности. Совмещение каучуков со связующим ПБ повышает также прочность удержания зерен алмазов в связке.

Физико-механические свойства и эластичность материалов на основе каучука во многом зависят от содержания серы. Для получения гибких инструментов содержание серы по отношению к массе каучука не должно превышать 10—15%. В тех случаях, когда количество серы составляет 30—40%, получают жесткие эбонитовые или полуэбонитовые связки. Технологический процесс изготовления каучукосодержащих смесей для эластичных связок не отличается от технологии изготовления вулканитовых абразивных масс. Важную роль играет тщательное проведение операций смешивания компонентов с каучуком, которое выполняется путем вальцевания. От равномерности распределения компонентов по всему объему алмазоносного слоя во многом зависит качество и эффективность применения инструмента. Смешивание каучука с другими компонентами производят на водоохлаждаемых валках, вращающихся с различной скоростью. Вначале в зазор вводят каучук, совмещенный со смолами, а затем после равномерного распределения его

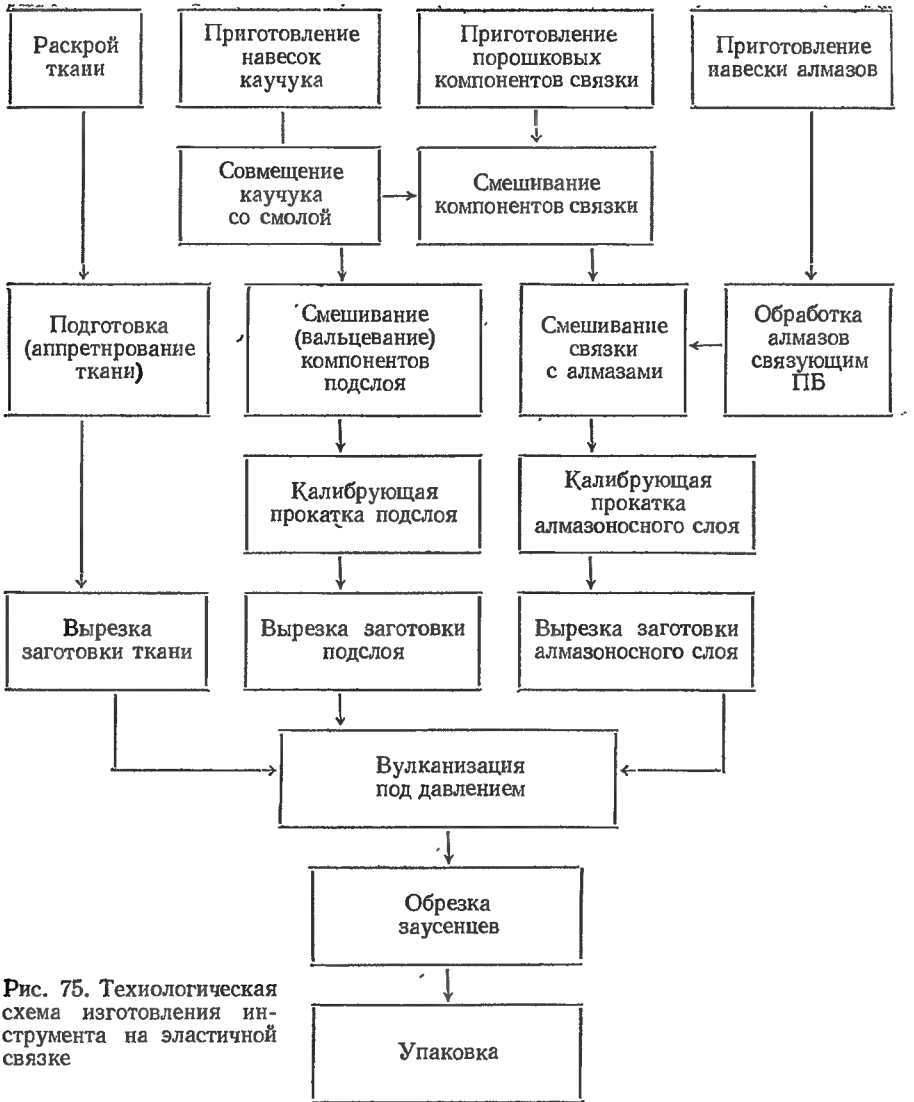


Рис. 75. Техиологическая схема изготовления инструмента на эластичной связке

по валку небольшими порциями загружают серу, окись цинка и магния. Охлаждение валков предотвращает разогрев и преждевременную вулканизацию смеси. Для улучшения пластичности в смесь добавляют мягчители, например дибутилфталат, и вещества, уменьшающие прилипание вальцуемой смеси к валкам, такие, как стеарин. В последнюю очередь в смесь вводят ускорители вулканизации.

Приготовленные связки хранят в помещении при температуре не выше 25° С в местах, защищенных от прямого попадания света. Так как при длительном хранении качество смеси снижается, срок хранеиия ограничивают десятью сутками. В приготовленную в соот-

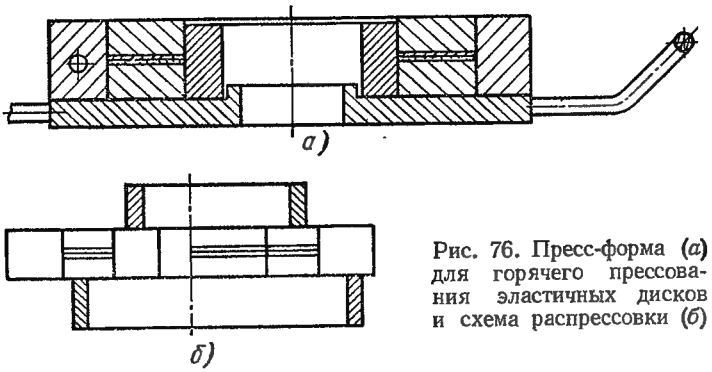


Рис. 76. Пресс-форма (*а*) для горячего прессования эластичных дисков и схема распрессовки (*б*)

ветствии с расчетом навеску связки вводят путем вальцевания алмазы и приготовляют, таким образом, материал, из которого при вулканизации получают алмазоносный слой. Для улучшения прочности закрепления алмазов в каучуковой связке их предварительно обрабатывают 20%-ным спиртовым раствором связующего ПБ. Количество раствора составляет 5% от массы алмазов. Такая обработка повышает качество алмазоносного слоя на каучуковой связке. Так как в процессе смешивания связки с алмазами происходит перетирание смеси, зерновой состав порошка изменяется. Дробление порошков будет тем меньше, чем быстрее произведено смешивание и чем меньше усилия, действующие на смесь в процессе вальцевания.

Для обеспечения точных размеров алмазоносного слоя приготовленный в результате смешивания связки и алмазов материал подвергают калибрующей прокатке на каландровых вальцах. Из полученной в результате этой операции ленты вырезают заготовки алмазоносного слоя, форма которых соответствует форме инструмента. Так как точность прокатки невысока, для обеспечения точного содержания алмазов в алмазоносном слое определяют массу полученной заготовки и при необходимости корректируют ее, добавляя тонкие полоски, прокатанные из остатков ленты. После вырезки заготовки алмазоносного слоя неиспользованные остатки ленты можно прокатать вторично. Для придания алмазоносному слою требуемых физико-механических свойств производят его вулканизацию. Эту операцию совмещают с прикреплением алмазоносного слоя к основе. Например, процесс вулканизации дисков выполняют под давлением в пресс-форме (рис. 76). В пресс-форму укладывают заготовку основы, вырезанную из ткани, пропитанной аппретирующим составом. В качестве основы дисков используют хлопчатобумажные ткани, а для бесконечных лент — лавсан повышенной прочности. Ткани аппретируют для придания им эластичности, обеспечения прочного сцепления основы с рабочим слоем, уменьшения вытяжки в процессе работы. Между тканевой основой и алмазоносным слоем размещают промежуточный слой из эластичной резины. Промежуточный слой улучшает эксплуатационные свойства инструмента, повышает его эластичность. При наличии подслоя обеспечивается полное срабатывание алмазоносного слоя.

Техника выполнения вулканизации не отличается от горячего прессования органических связок. На уложенные в пресс-форму заготовки основы, промежуточного и алмазоносного слоев устанавливают пуансон и сжимают на гидравлическом прессе. Одновременно пресс-форму нагревают до температуры 170—175° С с выдержкой 20—25 мин. Во время термической обработки происходит вулканизация каучука и соединение всех слоев в одно целое. Если на пуансоне нанесен рельеф, то отпечаток его остается на алмазоносном слое. Чтобы вулканизируемый слой не прилипал к деталям пресс-формы, пуансон и обойму смазывают. Можно также использовать для этих целей разделительную прокладку из целофана. Описанный технологический процесс можно использовать и для изготовления бесконечных лент. В качестве основы в этом случае применяют бесшовную рукавную ткань из лавсана, которую режут на ленты нужной ширины. На полученную заготовку на специальном приспособлении последовательно напрессовывают участки алмазоносного слоя до заполнения всей ленты. Таким образом получают бесшовные ленты. Как правило, алмазоносный слой ленты изготовляют с использованием жесткой связки, прочно закрепляющей алмазы. Чтобы ленте придать высокую гибкость, слой через небольшие равные расстояния надламывают.

На эластичных каучукосодержащих связках могут быть изготовлены не только гибкие инструменты в виде дисков и лент, но также и другие, например, круги, хонинговальные бруски и т. п. При окончательной обработке алмазного абразивного инструмента на эластичной связке удаляют заусенцы и вытечки, образовавшиеся при вулканизации. На нерабочую поверхность дисков наносят клеевой слой для соединения диска с шайбой станка. При контроле качества инструмента проверяют прочность соединения основы с алмазоносным слоем, наличие дефектов, разрывов, отслоений, крупных раковин. Качественный инструмент упаковывают и отправляют потребителю. В случае необходимости алмазы могут быть извлечены (рекуперированы) из эластичных связок и после соответствующей обработки вновь использованы.

Изготовление инструмента на металлической связке

Алмазные частицы в металлической связке можно закреплять методом литья алмазосодержащих сплавов; зачеканкой и шаржированием зерен в металлический, изготовленный из пластичных материалов корпус; методами порошковой металлургии и электрохимического осаждения. Промышленное значение имеют два последних метода, причем в общем объеме выпуска преобладает инструмент, изготовленный методами порошковой металлургии. Суть метода порошковой металлургии заключается в том, что смесь металлических порошков с другими компонентами подвергают уплотнению и последующей термической обработке (спеканию) при температуре ниже температуры плавления хотя бы одного из компонентов. В результате процессов диффузии, расплавления легкоплавких ком-

понентов с образованием растворов спрессованное тело после термической обработки приобретает высокую прочность, электропроводность и другие физико-механические свойства, приближающиеся к свойствам, аналогичным по составу материалов, полученных литьем. Использование в качестве исходных материалов порошков позволяет формовать в пресс-форме заготовки точные по форме и размерам, что сводит к минимуму объем механической обработки.

Температура нагрева инструмента при спекании значительно ниже температуры литого материала, из которого изготовлен порошок. Кроме того, отсутствуют многие ограничения, связанные с выбором компонентов сплавов. В отличие от литья методы порошковой металлургии позволяют создавать композиции, включающие несплавляемые друг с другом материалы, что и используется при закреплении алмазных частиц в металлической связке. При производстве алмазного инструмента полностью реализуются преимущества порошковой металлургии перед другими методами изготовления деталей из металлов и их сплавов. Например, возможность получения этим методом точных заготовок алмазоносного слоя позволяет сократить объем механической обработки труднообрабатываемых алмазосодержащих материалов. Большое значение имеет возможность методом порошковой металлургии получать композиционные материалы из несплавляемых веществ, что позволяет создавать наиболее эффективные связки для конкретных условий обработки и вводить в состав неметаллические наполнители, твердые смазки и т. п. Существенным является и то преимущество, что спекание происходит при более низкой температуре, чем при литье. Снижение температуры при изготовлении алмазного инструмента является одним из решающих факторов при выборе варианта технологического процесса. Следует учитывать также, что при использовании в качестве компонентов шихты связки металлических порошков легко обеспечить равномерное распределение зерен алмазов по всему объему алмазоносного слоя.

Преимущества метода порошковой металлургии обусловливают широкое применение его в промышленном производстве алмазного инструмента. Однако в ряде случаев, например, при производстве тонких (менее 0,2 мм) отрезных кругов, сложнофасонных и мелких инструментов, метод порошковой металлургии не может быть использован из-за технологических трудностей. Для закрепления алмазов в металлической связке при выпуске таких инструментов используются методы электрохимического производства.

Изготовление алмазоносного слоя методом порошковой металлургии. В производстве алмазного инструмента на металлической связке в настоящее время широко распространен процесс, включающий операции приготовления алмазосодержащей порошковой смеси (шихты алмазоносного слоя), брикетирование ее, спекание и уплотнение в нагретом состоянии с последующим охлаждением под давлением (рис. 77). В процессе изготовления из смеси алмазов и шихты связки формуется пористый брикет алмазоносного слоя, который в результате термической обработки и уплотнения приобретает

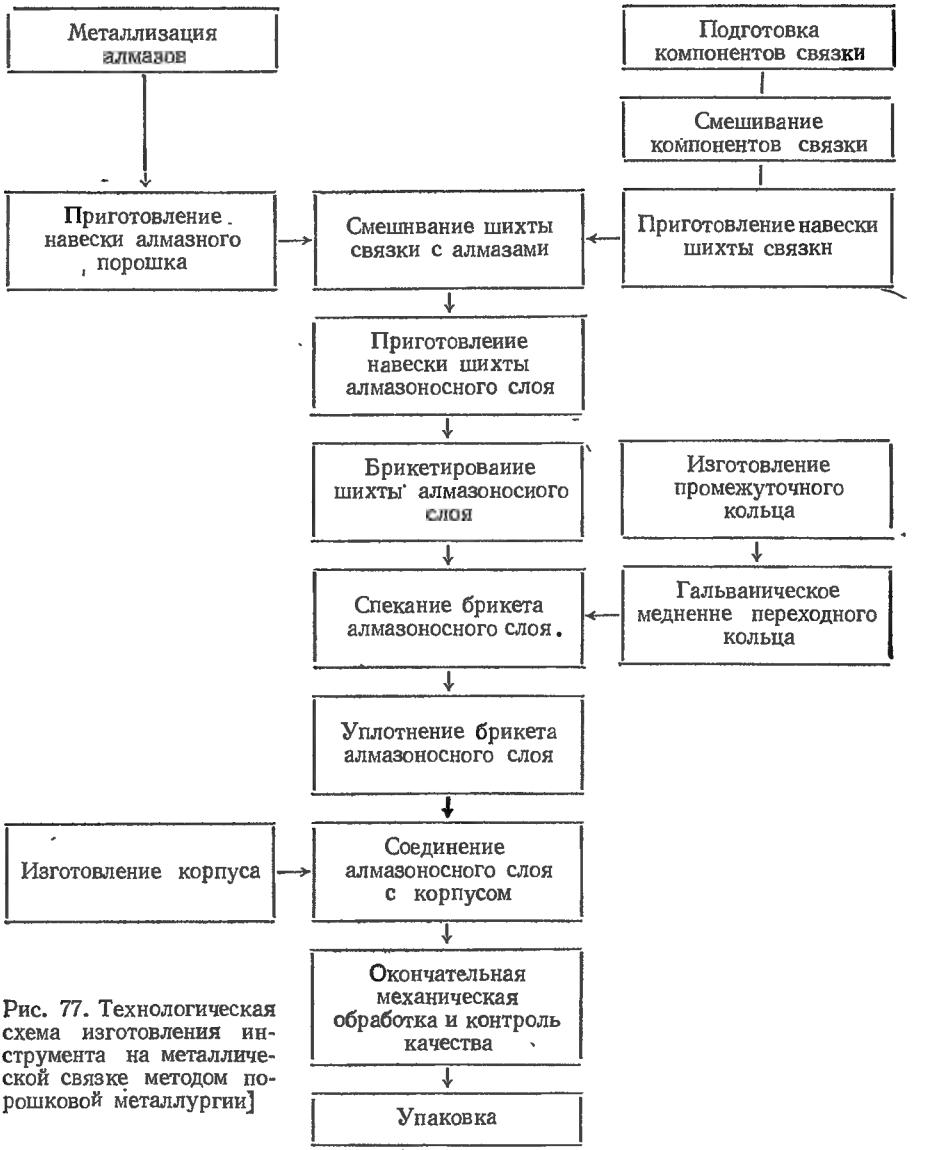


Рис. 77. Технологическая схема изготовления инструмента на металлической связке методом порошковой металлургии]

высокую прочность, износостойкость, точную геометрическую форму и размеры. Пластическая деформация в процессе уплотнения материала связки, нагретого при спекании выше температуры рекристаллизации, обеспечивает прочное охватывание и закрепление алмазных зерен, равномерно распределенных по всему объему алмазоносного слоя.

Принципиально можно изготовить алмазоносный слой на металлической связке без уплотнения после спекания, что существенно

упрощает технологический процесс и применяемую оснастку. Однако из-за наличия пор в алмазоносном слое в этом случае снижается прочность закрепления алмазов и как следствие — стойкость инструмента. Для повышения прочности закрепления алмазов в пористом слое необходимо использовать связки, химически взаимодействующие с алмазами во время спекания. При этом прочность удержания обеспечивается не только силами механического закрепления, но и путем химического соединения связки с алмазами. Такие связки называются адгезионно-активными и применяются в настоящее время для изготовления, например, хонинговальных брусков.

Инструменты простой формы можно изготовить методом пропитки. В этом случае смешивают алмазы с металлическими порошками, прессуют из полученной смеси пористый брикет, который пропитывают расплавленным металлом, имеющим температуру плавления, более низкую, по сравнению с температурой плавления металла, из которого приготовлена шихта. Несмотря на определенные преимущества описанных методов изготовления инструмента без уплотнения, они не получили широкого применения в промышленности. В настоящее время основным остается способ изготовления инструмента на металлической связке, включающий операцию уплотнения слоя в нагретом состоянии.

Применяемые материалы. В качестве основных компонентов шихты связки используются порошки чистых металлов меди, олова, железа, никеля и др. Металлические порошки получают дроблением или распылением расплавов, электролизом из солей, восстановлением окислов. Смешивая порошки металлов, взятые в определенном заданном соотношении, получают шихту различных металлических связок. Технология приготовления шихты связки существенно упрощается в том случае, когда для ее изготовления используют металлические порошки, полученные распылением литого многокомпонентного сплава. В результате распыления получают однородные по составу зерна сплава, которые и используют в качестве шихты связки. Однако таким путем могут быть получены порошки из сплавов с относительно низкой (до 700° С) температурой плавления.

Важными характеристиками порошков являются форма, размер частиц, насыпная масса и прессуемость. Форма и размер частиц зависят от способа получения порошка. Эти характеристики наряду с другими влияют на прочность брикета, полученного при спрессовывании порошков, и величину усадки брикета при спекании. По форме различают сферические, дендритные (разветвленные) и осколочные порошки (рис. 78). Прочность брикета, спрессованного из частиц дендритной формы, выше, чем у брикетов, изготовленных из сферических и осколочных порошков того же металла. Размер частиц металлического порошка колеблется от долей микрометра до 0,5 мм. Для изготовления алмазного инструмента используют в основном мелкие порошки дендритной формы, частицы которых проходят через сито с квадратными ячейками размером в свету 40—100 мкм.

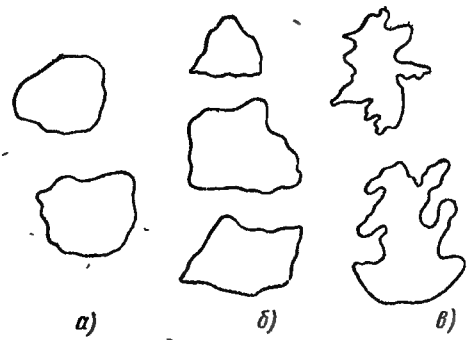


Рис. 78. Формы частиц металлических порошков:

а — сферические; *б* — осколочные; *в* — дендритные

Насыпная масса (количество порошка в единице объема) зависит от совокупного действия ряда факторов — материала, формы, зернового состава, состояния поверхности частиц, их размера. Плотность порошка, как правило, в 3—5 раз меньше плотности компактного изделия, из-за чего объем загрузочной камеры пресс-формы для прессования должен быть во столько же раз больше.

Прессуемость — свойство металлического порошка образовывать под воздействием обжатия прочные брикеты, не изменяющие своей формы после снятия давления. Прессуемость характеризуется изменением плотности брикета под воздействием увеличивающегося давления. Она зависит в основном от пластичности металла, из которого изготовлен порошок, формы его частиц, способа получения. Порошки пластичных металлов меди, олова и алюминия обладают лучшей прессуемостью по сравнению с порошками железа, кобальта и никеля. В качестве примера на рис. 79 показано изменение пористости брикета, спрессованного из медного порошка, в зависимости от давления. Как видно из графика, с повышением давления пористость уменьшается вначале быстро — это связано с переукладкой частиц в пресс-форме. Затем темп уплотнения снижается — происходит некоторая деформация частиц, заклинивание их друг с другом. Одновременно с уменьшением пористости растет прочность брикета. Для хорошо и удовлетворительно прессующихся порошков меди, олова, алюминия, железа и никеля достаточная прочность брикета достигается при плотности 0,6—0,8 от беспористой. Промышленность выпускает широкую номенклатуру металлических порошков, которые применяют при изготовлении алмазного инструмента.

Электролитический порошок меди ПМС-2 (ГОСТ 4960—68) используют в качестве одного из компонентов многих связок, так как он обладает высокой пластичностью и хорошей прессуемостью. Форма частиц порошка — дендритная. При просеивании порошка через проволочное сито с размером ячеек 45 мкм должно проходить по массе не менее 85% частиц. Насыпная масса медного порошка составляет 1,2—2,2 г/см³. При хранении

Рис. 79. Изменение относительной плотности от давления прессования

на воздухе медный порошок окисляется и становится непригодным для изготовления инструмента без предварительного восстановления.

Порошок олова ПО1 (ГОСТ 9723—73), получаемый распылением, применяют в качестве одного из компонентов связок, так как он обладает хорошей прессуемостью, образует прочные брикеты при малых удельных давлениях прессования и имеет низкую температуру плавления. Насыпная масса порошка по опытным данным составляет 3,2—3,9 г/см^3. Порошок олова должен храниться при температуре не ниже +12° С. При более низкой температуре олово переходит в другую мелкокристаллическую модификацию, превращаясь в очень мелкий неспрессовывающийся серый порошок. Это явление называют «оловянной чумой». Для изготовления инструмента используют также порошки цветных металлов: никеля ПНЭ1 (ГОСТ 9722—77), кобальта ПК1 (ГОСТ 9721—71), цинка ПЦВ (ГОСТ 12601—67), алюминия АПС-1 (ГОСТ 10096—62) и др.

Порошок железа получают восстановлением окалины с последующим дроблением. В производстве алмазного инструмента применяют порошок ПЖ (ГОСТ 9849—61). В зависимости от содержания в порошке основного металла порошки железа по химическому составу делятся на 5 групп: ПЖ1, ПЖ2, ПЖ3, ПЖ4, ПЖ5; по зерновому — на 4 группы: крупный К, средний С, мелкий М и очень мелкий ОМ. Форма частиц железного порошка — дендритная. Для алмазного инструмента наиболее пригоден самый мелкий порошок ОМ. Гранулометрический состав этого порошка характеризуется следующими цифрами: через сито с размером ячеек 160 мкм должен проходить весь порошок, размером 71 мкм — не менее 95% по массе и 56 мкм — не менее 70%. Насыпная масса такого порошка по опытным данным составляет 2,7—3 г/см^3. Поставляется железный порошок в металлических банках емкостью 40 л.

Порошки твердых сплавов (смесь мелкозернистых частиц карбида вольфрама или карбида титана с кобальтом) используют в качестве наполнителя или связки. В последнем случае алмазоносный слой изготовляют методом горячего прессования. Твердосплавные смеси плохо прессуются. Без введения в шихту специальных клеящих добавок нельзя получить прочный брикет даже при высоком давлении.

Корпуса инструмента на металлических связках в основном изготовляют из стали. При выпуске простых по форме инструментов корпус прессуют из металлического порошка одновременно с алмазоносным слоем. При производстве крупногабаритного инструмента корпус для облегчения изготовляют из алюминия. В этом случае алмазоносный слой напрессовывают на промежуточное стальное кольцо, а затем кольцо соединяют с корпусом.

Вспомогательные материалы используют для увлажнения шихты при смешивании, для защиты алмазоносного слоя и поверхностей деталей пресс-форм и изделий от окисления, для протирки оснастки и т. п. Ниже приведены характеристики вспомогательных материалов, используемых при изготовлении алмазного абразивного инструмента на металлической связке:

Наименование	Назначение
Спирт этиловый ректификованный высшей очистки из гидролизного сульфитного спирта (ТУ 3—66—65)	Промывка деталей вакуумной аппаратуры; приготовление увлажнителя для смачивания алмазов перед смешиванием
Глицерин (ГОСТ 6824—54)	Приготовление увлажнителя для смачивания алмазов перед смешиванием
Ацетон технический (ГОСТ 2768—69)	Промывка деталей для удаления жировых пленок
Ткань обтирочная мягкая (ГОСТ 5354—68)	Протирка барабанов для смешивания, деталей пресс-форм
Коллоидально-графитовый препарат ВО (ГОСТ 5245—50)	Смазка поверхностей пресс-форм для спекания, для защиты их от окисления и припекания к алмазоносному слою
Водород газообразный (ГОСТ 3022—70)	Подача в герметичный контейнер при спекании изделий для создания восстановительной среды
Азот (ГОСТ 9293—59)	Продувка герметичного контейнера для удаления воздуха перед пуском водорода; продувка для удаления из контейнера водорода перед открыванием дверцы контейнера после спекания

Составы металлических связок. При выборе состава связки учитывают эксплуатационные и технологические требования. К первым относят: износостойкость, твердость, прочность удержания алмазов, теплопроводность, коэффициент трения и другие свойства, определяющие эффективность работы инструмента. Однако не во всех случаях удается использовать составы, наилучшие по эксплуатационным соображениям, из-за ограничений, накладываемых возможностями технологического процесса изготовления инструмента. Например, температура спекания алмазоносного слоя ограничивается термостойкостью алмазов и прочностью материала пресс-формы, в которой производят уплотнение. По этим соображениям температура спекания не может превышать 850° С, что ограничивает возможности использования в качестве связок металлов, которые имеют более высокую температуру спекания. При определении состава связки должны быть учтены и некоторые другие технологические требования. Шихта связки должна иметь хорошую прессуемость и образовывать прочные брикеты при умеренных (не более 4000 кгс/см^2) давлениях прессования, так как более высокое давление может привести к существенному дроблению алмазов. При температуре спекания материал связки алмазоносного слоя должен иметь высокую пластичность, чтобы его уплотнение до беспористого состояния осуществлялось при давлении не более 1500 кгс/см^2. При бо́льших давлениях пресс-формы быстро выходят из строя из-за деформаций деталей. Кроме того, материал связки должен обеспечивать прочное соединение с корпусом и промежуточным металлическим кольцом в процессе спекания и горячей допрессовки за счет диффузии. В тех случаях, когда алмазоносный слой припаивается к корпусу, материал связки должен хорошо смачиваться припоем. Таким образом, выбор состава связки, полностью удовлетворяющего эксплуатационным и технологическим требованиям, является сложной задачей. При ее решении большое внимание

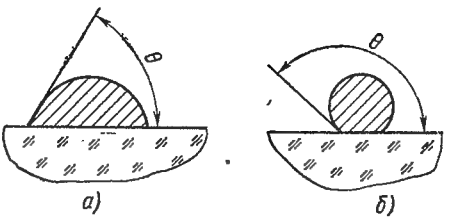


Рис. 80. Схема равновесной капли жидкого металла на твердой поверхности:

а — металл смачивает алмаз ($\theta < 90°$); *б* — металл не смачивает алмаз ($\theta > 90°$)

должно быть уделено выбору основного материала, преобладающего в составе связки и определяющего технологические режимы изготовления и физико-механические свойства алмазоносного слоя.

Как правило, пригодность материала связки оценивают по износостойкости в условиях абразивного износа. При этом необходимо учитывать, что алмазоносный слой является композиционным материалом и его износ определяется скоростью износа как связки, так и алмазов. Зерна алмазов, выступая над поверхностью, защищают связку от износа. Поэтому длительность эксплуатации инструмента при прочих равных условиях определяется не только свойствами связки и стойкостью ее по отношению к абразивному износу, но и прочностью закрепления алмазов.

Прочное закрепление алмазов обеспечивается при применении в качестве основы связки железа, кобальта, никеля, хрома, стали, твердого сплава и т. д. Однако эти материалы в чистом виде в качестве связок не применяют, так как они плохо прессуются при умеренных давлениях, а их термическая обработка производится при высокой температуре. Поэтому для улучшения прессуемости и снижения температуры спекания в композиции на основе железа и других вышеуказанных металлов вводят пластичные материалы, такие как медь, олово и др. Введение этих металлов снижает стойкость материала связки к абразивному изнашиванию. Однако износостойкость алмазоносного слоя при этом может остаться достаточно высокой, так как повышение пластичности материала связки приводит при прочих равных условиях к лучшему схватыванию и увеличению прочности удержания алмазных зерен, защищающих связку от износа. Этим же, по-видимому, объясняется высокая размерная стойкость инструмента на металлических связках на основе меди, алюминия и других металлов, которые в чистом виде не отличаются долговечностью в условиях абразивного износа.

Высокая износостойкость алмазоносного слоя может быть достигнута в результате прочного закрепления зерен алмазов в адгезионно-активных связках. В этом случае зерна во время спекания смачиваются связкой и прочно соединяются с ней. Для характеристики активности взаимодействия алмазов и расплавленного металла определяют угол смачивания, который образуется между поверхностью капли расплавленного металла и плоскостью кристалла алмаза, на котором она расположена. Капля металла, смачивающего алмаз, растекается по его поверхности; у металлов, не смачивающих, — не растекается (рис. 80). Количественно активность взаимодействия связки с алмазом определяют величиной краевого угла

смачивания θ. Для металлов, смачивающих алмаз (титан, кобальт, хром), этот угол меньше 90°, для несмачивающих (медь, олово и других) — больше. Установлено, что небольшая добавка адгезионно-активного к алмазу металла, например, титана, приводит к образованию сплавов, смачивающих алмаз. Из-за высокой прочности удержания алмазов использование адгезионно-активных связок является перспективным. Следует отметить также, что при применении таких связок можно изготовлять инструменты без уплотнения алмазоносного слоя в нагретом состоянии.

По составу металлические связки делятся на однокомпонентные и многокомпонентные. Однокомпонентные связки на основе меди или алюминия отличаются хорошей пластичностью и прессуемостью. Однако их применение ограничено, так как твердость и износостойкость алмазосодержащих материалов на основе чистых металлов невысоки. Высокая износостойкость может быть достигнута при использовании в качестве связки таких материалов, как кобальт. Однако из-за его дефицитности и высоких технологических режимов изготовления этот материал не получил широкого распространения.

Многокомпонентные связки, как правило, приготовляют, смешивая металлические порошки с различными добавками неметаллических веществ, абразивных материалов, твердых смазок и др. Сочетание прочной и пластичной металлической основы с легирующими элементами и наполнителями обеспечивает прочное удержание алмазов, высокую твердость, износостойкость алмазоносного слоя инструмента при хороших режущих свойствах. Использование многокомпонентных связок позволяет наилучшим образом обеспечить как технологические, так и эксплуатационные свойства алмазоносного слоя. В качестве основного компонента материала связки используются медь, алюминий, железо, кобальт, твердый сплав и другие металлы.

Связки на основе меди с добавками олова, свинца, цинка пригодны для изготовления многих видов абразивного алмазного инструмента, применяемого для обработки твердого сплава и неметаллических материалов. Эти составы хорошо прессуются и спекаются при умеренных температурах, обладают высокой прочностью, теплопроводностью и удовлетворительной износостойкостью. В промышленности, как правило, используют составы типа бронз с различным соотношением меди, олова и других материалов.

Инструменты с алмазоносным слоем на основе алюминия изготовляют для обработки стекла, шлифования твердых сплавов, заточки твердосплавного инструмента. Термическая обработка алмазоносного слоя на алюминиевой связке может быть выполнена без защитной среды при сравнительно низкой температуре (ниже 600° С), что является важным технологическим достоинством. Шихту связки на основе алюминия можно приготовить, не только смешивая порошки в заданном соотношении, но и из литого сплава. В этом случае вначале сплавляются компоненты, входящие в состав связки, а затем в специальном устройстве производят распыление сплава. Засты-

вая, брызги металла образуют порошок, который после рассева используют в качестве шихты связки.

Связки на основе железа используют для изготовления инструмента, применяемого для резания и шлифования неметаллических материалов, когда требуется высокая износостойкость и прочность алмазоносного слоя. Температура термической обработки, давление брикетирования и горячей допрессовки у этих составов выше чем у бронзовых и алюминиевых. Поэтому для уменьшения пластичности и снижения температуры спекания в состав связок на основе железа вводят дополнительно порошки меди, олова и др.

Наиболее износостойкие и прочные связки могут быть изготовлены на основе твердых сплавов методом пропитки или горячего прессования при кратковременном воздействии высоких температур, достигающих 1400° С. Время, в течение которого алмазоносный слой подвергают высокотемпературному нагреву, строго ограничивается из-за возможного окисления и графитизации алмазов.

Как правило, состав связки для конкретных условий обработки выбирается экспериментально. Широко применяется, например, связка М1 на основе оловянистой бронзы с содержанием (по массе) меди 80% и олова 20%. Инструменты на этой связке используются преимущественно для обработки неметаллических материалов. Связка обеспечивает высокие физико-механические свойства алмазоносного слоя и технологична в изготовлении.

Расчет содержания компонентов шихты. Масса шихты металлической связки $G_{св}$ для изготовления инструмента алмазоносного слоя, объем которого V известен, с учетом технологических потерь при смешивании и засыпке шихты алмазоносного слоя в полость пресс-формы рассчитывается по формуле

$$G_{св} = V\left(1 - 0{,}25\frac{K}{100}\right)\gamma_{св}K_{п},$$

где V — объем алмазоносного слоя в см³;
K — концентрация;
$\gamma_{св}$ — плотность связки в г/см³;
$K_{п}$ — коэффициент потерь.

Эта формула справедлива для беспористого алмазоносного слоя при использовании неметаллизированных алмазов. В отличие от органических связок состав шихты металлической связки задается процентным соотношением массы компонентов. Соотношение компонентов в шихте связки остается неизменным для любой концентрации алмазов. Плотность связки $\gamma_{св}$ при предположении, что во время спекания плотность и соотношение по массе компонентов, входящих в состав связки, не меняется:

$$\gamma_{св} = \frac{100}{\sum_{i=1}^{n}\frac{q_i}{\gamma_i}},$$

где q_i — содержание по массе компонента в %;
γ_i — плотность компонента в г/см³.

Формула для определения $\gamma_{св}$ выведена исходя из следующих соображений. Если взять 100 г связки, состоящей из n компонентов, то масса каждого из них будет соответствовать численно величине процентного содержания. Объем, занимаемый каждым компонентом, составит $\frac{q_i}{\gamma_i}$, а сумма этих величин $\sum_{i=1}^{n} \frac{q_i}{\gamma_i}$ определит объем, который занимают 100 г связки. По известной массе материала и объему плотность

$$\gamma = \frac{G}{V}.$$

Подставляя в эту формулу массу 100 г и объем, который эта масса занимает $\sum_{i=1}^{n} \frac{q_i}{\gamma_i}$, получаем выражение, приведенное выше. Формула расчета плотности справедлива для любых беспористых материалов, когда соотношение компонентов задано в процентах по массе. Подставляя плотность $\gamma_{св}$ в формулу для определения массы связки, получаем

$$G_{св} = V\left(1 - 0{,}25\,\frac{K}{100}\right)\frac{100}{\sum_{i=1}^{n} \frac{q_i}{\gamma_i}} K_{п}.$$

Когда инструмент изготовляют из алмаза с покрытием, то объем связки в одном кубическом сантиметре алмазоносного слоя уменьшают на величину $v_з$, занимаемую материалом покрытия. Порядок расчета величины $v_з$ описан ранее. Подставляя в формулу значение $v_з$, получаем

$$G_{св} = V\left(1 - 0{,}25\,\frac{K}{100} - \frac{8{,}8Kq_з}{\gamma_з}\,10^{-5}\right)\frac{100}{\sum_{i=1}^{n} \frac{q_i}{\gamma_i}} K_{п}.$$

По известной массе связки количество каждого компонента

$$G_i = \frac{q_i}{100} G_{св}.$$

В некоторых случаях алмазоносный слой изготовляют с небольшим припуском на механическую обработку, в связи с чем корректируют массу шихты связки. Для этого рассчитывают объем припуска $V_{пр}$ и добавляют к расчетной величине $G_{св}$ количество, соответствующее этому объему, $G_{св}^{пр} = \gamma_{св} V_{пр}$.

При таком порядке расчета величина концентрации алмазов по отношению к заданной изменяется незначительно, так как добавляемая шихта связки изменяет соотношение между объемом алмаза и объемом шихты связки. Как правило, уменьшение концентрации не превышает 5%, что допустимо в условиях эксплуатации

инструмента. Норму расхода материала с учетом потерь и отходов при просеивании порошков и их смешивании увеличивают в 1,2—1,4 раза против расчетного значения.

Пример. Определить массу компонентов шихты связки для изготовления алмазоносного слоя круга АПП 200×10×5 на связке М1 при 100%-ной концентрации.

Объем алмазоносного слоя круга составляет 30,6 см³, объем припуска на механическую обработку 1,1 см³. При использовании алмазов без покрытия объем материала связки

$$V_{св} = V\left(1 - 0{,}25\,\frac{K}{100}\right) = 30{,}6\left(1 - \frac{0{,}25 \cdot 100}{100}\right) = 30{,}6 \cdot 0{,}75 = 23 \text{ см}^3.$$

По известным значениям плотности меди 8,94 г/см³ и олова 7,3 г/см³ и процентному содержанию их в связке — 80 и 20% соответственно — определяем

$$\gamma_{м_1} = \frac{100}{\sum_{i=1}^{n} \frac{q_i}{\gamma_i}} = \frac{100}{\frac{80}{8{,}9} + \frac{20}{7{,}3}} = 8{,}54 \text{ г/см}^3.$$

Для изготовления алмазоносного слоя круга при коэффициенте потерь $K_п = 1{,}1$ требуемое количество связки

$$G_{св}^{ас} = V_{св}\gamma_{св}K_п = 23 \cdot 8{,}54 \cdot 1{,}1 = 216{,}1 \text{ г}.$$

К этому количеству добавляется масса связки $G_{св}^{пр}$ соответствующая объему припуска $V_{пр} = 1{,}1$ см³:

$$G_{св}^{пр} = \gamma_{св}V_{пр} = 8{,}54 \cdot 1{,}1 = 9{,}4 \text{ г}.$$

Тогда общая масса связки составит:

$$G_{св} = G_{св}^{а.с} + G_{св}^{пр} = 216{,}1 + 9{,}4 = 225{,}5 \text{ г}.$$

Количество меди для приготовления шихты

$$G_м = G_{св}\,\frac{q_м}{100} = 225{,}5\,\frac{80}{100} = 180{,}4 \text{ г}.$$

Количество олова

$$G_о = G_{св}\,\frac{q_о}{100} = 225{,}5\,\frac{20}{100} = 45{,}1 \text{ г}.$$

Приготовление шихты алмазоносного слоя. Шихта алмазоносного слоя после смешивания при высокой степени равномерности распределения всех компонентов по объему должна иметь состав, соответствующий заданному, обладать хорошей сыпучестью, не комковаться и не расслаиваться в процессе хранения, транспортировки и засыпки в полость пресс-формы. Оборудование и технологические приемы выполнения операций приготовления алмазосодержащей шихты на металлической связке принципиально не отличаются от описанных в разделе для органических жестких связок. Вначале из компонентов приготовляют шихту связки, а затем по мере необходимости отвешивают требуемое количество шихты связки и смешивают с алмазами. Поэтому технологический процесс приготовления шихты алмазоносного слоя включает следующие

основные операции: подготовку и дозирование компонентов шихты связки и алмазов, смешивание этих навесок с увлажнением.

Характеристики металлических порошков и материалов, применяемых для изготовления шихты связки, должны соответствовать требованиям технических условий. Основные показатели качества, химический состав, гранулометрический состав проверяют в заводской лаборатории. Подготовка компонентов, как правило, включает операции просеивания на ситах, а в некоторых случаях дробления и классификации. Компоненты, которые поставляются в виде готовых порошков, должны быть просеяны через сита для удаления крупных частиц. Обычно для изготовления инструмента применяют мелкие фракции металлических порошков, просеянные через сита с квадратными ячейками с размером в свету 40—100 мкм. Мелкие порошки металлов более активны при спекании, для их спекания требуются меньшие температуры. Однако при просеивании стандартных порошков для получения мелких фракций остается большое количество крупных. Поэтому очень мелкие порошки, отсеянные на ситах с размером ячеек 40 мкм, целесообразно применять для приготовления шихты алмазоносного слоя инструмента только из микропорошков алмазов. Шихта, в состав которой входят шлифпорошки алмазов, может быть приготовлена из металлических порошков, просеянных через сита с размером ячеек 63—100 мкм.

Металлические порошки при длительном хранении окисляются. Пленка окислов, образующаяся на поверхности частиц, ухудшает условия их спекания, поэтому желательно порошок перед применением подвергнуть восстановлению. С этой целью порошок нагревают в среде водорода. В результате взаимодействия с водородом окислы восстанавливаются до чистого металла по реакции

$$Me_xO_y + yH_2 = x\,Me + y\,H_2O.$$

Температура нагрева для восстановления зависит от температуры плавления металла. Чем выше температура нагрева, тем активнее происходит процесс восстановления. Однако при высокой температуре происходит припекание частиц друг к другу, поэтому температуру восстановления ограничивают. Например, для восстановления медного порошка его нагревают в токе осушенного водорода при температуре 450° С. После полного охлаждения в водороде полученный брикет легко дробится. Восстановленный порошок хранят в герметичной таре не более 7—14 суток. Компоненты связок, которые не выпускаются в виде порошков, предварительно дробят и просеивают через сита с размером ячеек 40—100 мкм. Для дробления могут быть использованы вихревые, валковые, шаровые мельницы и другие виды измельчающих устройств. Подготовленные компоненты шихты связки развешивают на технических весах с точностью до 0,1 г в соответствии с рецептурой и загружают в барабанные смесители. Объем барабана для смешивания шихты

$$V_{бар} = \frac{G_ш}{\gamma_ш 0{,}4},$$

где $G_{ш}$ — количество смешиваемой шихты в г;
$\gamma_{ш}$ — плотность шихты в г/см³.
0,4 — коэффициент, учитывающий степень загрузки барабана.

Для большинства металлических связок плотность шихты 1,5—2 г/см³. Так как в состав шихты связки входят компоненты, существенно различающиеся по плотности, высокое качество смеси достигается только при длительном смешивании. Время смешивания, достаточное для равномерного распределения компонентов по всему объему шихты связки, определяется экспериментально. При частоте вращения барабана 30—50 об/мин и коэффициенте заполнения объема 0,4 длительность смешивания для получения однородной шихты достигает 24—48 ч. Качество смешивания шихты связки проверяют химическим анализом, для чего из разных точек объема смесителя или тары, где хранится шихта связки, отбирают пробы. Процентное содержание компонентов не должно отличаться от заданного более чем на 0,5%. В шихте не должно быть комков и крупных слипшихся частиц компонентов.

Для комплексной проверки качества шихты связки отбирают пробу и изготовляют контрольные образцы. Затем определяют твердость полученного материала, прочность на изгиб, удельную ударную вязкость. Полученные значения должны быть не ниже предусмотренных техническими условиями на связку. После проверки годную шихту связки упаковывают в герметичную тару, в которой она может храниться не более 14 суток. При более длительном хранении компоненты могут окислиться, что снизит качество шихты. По мере необходимости из шихты связки приготавливаются навески, которые смешивают с навесками алмазов вручную или в смесителях. Количество алмазного порошка по известному объему инструмента, концентрации и массе покрытия определяется по тем же формулам, что и для органических связок.

Для предотвращения расслаивания компонентов шихты алмазоносного слоя и улучшения равномерности их распределения смешивание производят с добавкой увлажнителя. В качестве увлажнителя могут быть использованы бензин, веретенное и вазелиновое масло, смесь глицерина со спиртом и другие вещества. Наилучший эффект получают при использовании 20%-ного раствора глицерина в спирте. Такая жидкость хорошо и равномерно смачивает частицы шихты. После испарения спирта на поверхности частиц остается тонкая пленка глицерина, склеивающая частицы и полностью сгорающая при спекании. Последовательность и содержание операций приготовления шихты алмазоносного слоя зависит от крупности порошков алмазов.

Смешивание шихты связки со шлифопорошками алмазов выполняют в такой последовательности: тщательно смешивают навеску порошка алмаза с увлажнителем, количество которого определяют из расчета 1—3% от массы шихты связки. Увлажненную навеску алмазного порошка затем перемешивают с шихтой связки вручную в течение 3—20 мин или при большой массе шихты алмазоносного

слоя (более 0,5 кг) в барабанных смесителях. При такой последовательности к увлажненной поверхности зерен алмаза прилипают частицы компонентов связки, что способствует равномерному распределению алмазов в связке при смешивании. Время смешивания компонентов алмазоносного слоя меньше, чем при приготовлении шихты связки. При указанных выше режимах качественное смешивание может быть достигнуто за 5—15 ч. Для разбивания слипшихся частиц шихты связки или алмазов во время смешивания в барабан смесителя могут быть загружены стальные шары диаметром 5—15 мм из расчета 5—10 шт. на каждый килограмм приготавливаемой шихты. После смешивания алмазосодержащую смесь развешивают на отдельные порции, которые используют для изготовления инструмента.

При приготовлении шихты алмазоносного слоя из микропорошков алмаза особое внимание следует обращать на чистоту оснастки и оборудования. Попадание в металлическую связку даже одного зерна более крупной зернистости по сравнению с остальными, может привести к образованию на обрабатываемой поверхности царапин. Чтобы предотвратить попадание крупных зерен в микропорошки необходимо:

а) при приготовлении смесей, содержащих микропорошки, оборудовать отдельное помещение;

б) для каждой зернистости алмазного порошка иметь отдельные емкости для смешивания и отдельную оснастку;

в) при переходе от одной зернистости к другой тщательно очищать все поверхности оснастки и оборудования от остатков шихты, протирать и просушивать их;

г) при последовательном приготовлении навесок шихты алмазоносного слоя различной зернистости алмаза начинать с той навески, в состав которой входит самый мелкий порошок, переходя потом к более крупным.

При смешивании шихты связки с микропорошками алмазов, склонными к слипанию, для получения однородной шихты вводят дополнительную операцию. После предварительного смешивания сухой шихты связки и алмаза полученную смесь 3—4 раза протирают через сито с размером ячеек в свету 160—200 мкм и затем увлажняют. Это обеспечивает растирание комков и равномерное распределение зерен алмаза по всему объему шихты. Для каждой зернистости микропорошков необходимо иметь отдельное сито. Увлажненную шихту смешивают в барабанном смесителе так, как было описано ранее. При контроле качества шихты алмазоносного слоя проверяют под микроскопом равномерность распределения зерен алмазов по всему объему. В качественно приготовленной шихте не должно быть слипшихся зерен. После контроля качества навески используют для брикетирования алмазоносного слоя.

Брикетирование. Операции брикетирования, спекания и уплотнения можно рассматривать как последовательные стадии превращения смеси разрозненных частиц связки и алмазов в твердое тело определенной формы. Для получения точных размеров алмазо-

носного слоя брикетирование и уплотнение производят в пресс-формах (табл. 40). Поскольку температура и давление при брикетировании и уплотнении существенно различаются, для выполнения этих операций используют, как правило, две различные пресс-формы. Это позволяет упростить пресс-формы для спекания, работающие при высоких давлениях и температурах, уменьшить расход дорогостоящих жаропрочных материалов и снизить трудоемкость обработки деталей. В некоторых случаях, при изготовлении фасонных инструментов, когда перекладка брикета в другую пресс-форму невозможна, используют для брикетирования и уплотнения одну и ту же пресс-форму. В результате брикетирования сыпучая шихта алмазоносного слоя спрессовывается в заготовку, форма и размеры которой близки к окончательным. Операция производится при комнатной температуре. Так как полученный при этом брикет, как правило, перекладывают для спекания и уплотнения в другую пресс-форму, он должен быть прочным, иметь неосыпающиеся края. Качество брикетов зависит в основном от свойств шихты связки, давления прессования, конструкции и точности пресс-формы.

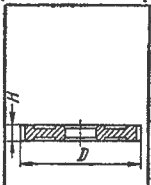
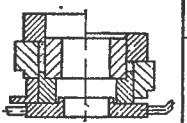
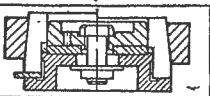
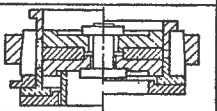
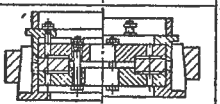
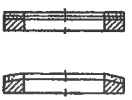
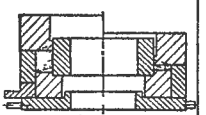
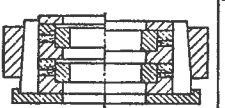
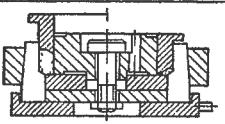
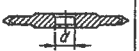
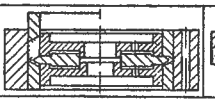
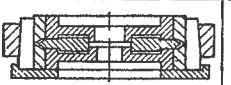
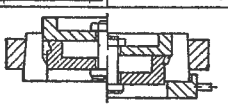
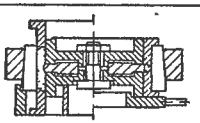
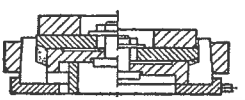
Спрессовывание шихты алмазоносного слоя на металлической связке в брикет под воздействием внешнего давления подчиняется общим закономерностям прессования металлических порошков и смесей. Из-за наличия в составе шихты большого количества алмазных зерен (до 50 объемных процентов), тормозящих процесс ее формования, для каждого состава существует предел уплотнения, который не может быть превзойден простым повышением давления прессования. Поэтому в результате первой стадии формования получают пористый брикет. Прочность и другие его свойства во многом определяют давлением при прессовании. Давление брикетирования, при котором получают прочные, неосыпающиеся брикеты алмазоносного слоя с пористостью, не превышающей 15—25%, подбирают экспериментально. Для большинства металлических связок давление лежит в пределах 2000—4000 кгс/см^2. Для бронзовой связки М1 достаточно, например, давление 3000 кгс/см^2. Более высокое давление прессования приводит к передрабливанию алмазов.

Конструкция пресс-формы и схема прессования алмазоносного слоя зависят от размеров и формы изготовляемого инструмента. Алмазоносный слой простой конфигурации с соотношением высоты к ширине не более 3 : 1 брикетируют в пресс-формах по схеме одностороннего прессования. При соотношениях размеров алмазоносного слоя, превышающих указанные, одностороннее прессование не обеспечивает равномерной плотности по высоте. Для уменьшения потерь на силы трения шихты о стенки обоймы применяют пресс-формы с перемещающимся корпусом. В пресс-формах такой конструкции можно формовать алмазоносный слой с соотношением высоты к ширине 10 : 1.

Брикетирование алмазоносного слоя может быть выполнено «по давлению» или «до упора». В первом случае трудно обеспечить точные размеры брикета, так как давление, непосредственно приложенное к слою, зависит от многих факторов: точности приборов,

Таблица 40

Типовые конструкции пресс-форм для изготовления инструмента на металлической связке

№ по пор.	Форма инструмента	Конструкции пресс-форм				Примечание
		для брикетирования		для спекания		
		Начало прессования	Конец прессования	Начало уплотнения	Конец уплотнения	
1						$H > 10$ мм $D = 30 \div 200$ мм
2						$H > 16$ мм $D = 60 \div 100$ мм
3						$H > 16$ мм $D > 120$ мм
4						—
5						—
6						—
7						—
8						—
9						—

показывающих давление в гидросистеме пресса, степени износа пресс-форм; сил трения шихты о стенки пресс-форм и т. д. На заводах алмазного инструмента предпочтение отдают второй схеме,

при которой заданные размеры и пористость брикета гарантируются точностью размеров пресс-форм и величиной навески шихты алмазоносного слоя. Расчетная сила брикетирования алмазоносного слоя при прессовании «до упора» определяется так же, как и для органических связок.

Пример. Рассчитать силу брикетированиия алмазоносного слоя круга формы АПП 200×10×5 на связке М1.

1. Определяем площадь алмазоносного кольца:

$$F = \frac{\pi D_1^2}{4} - \frac{\pi D_2^2}{4} = \frac{\pi}{4}(20^2 - 19^2) = 30{,}6 \text{ см}^2,$$

где D_1 — наружный диаметр алмазоносного слоя в см;
D_2 — внутренний диаметр алмазоносиого слоя в см.

2. Сила брикетирования

$$P = 1{,}3pF = 1{,}3 \cdot 3000 \cdot 30{,}6 = 119\,340 \text{ кгс}.$$

При брикетировании алмазоносного слоя выполняют операции: подготовку и сборку пресс-формы, укладку корпуса или промежуточного кольца, засыпку и разравнивание навески шихты безалмазного и алмазоносного слоев, прессование, разборку и извлечение брикета. В тех случаях, когда уплотнение после спекания производят в той же пресс-форме, что и брикетирование, например, при изготовлении хонинговальных брусков, последние две операции не выполняют. Для холодного брикетирования алмазоносного слоя шлифовальных кругов используют пресс-формы той же конструкции, что и для органических связок. Перед сборкой все детали пресс-форм тщательно очищают, а формующие полости промывают ацетоном и протирают чистой ветошью для удаления остатков шихты от предыдущего формования. Формообразующие поверхности пуансонов и матриц пресс-форм смазывают тонким слоем смазки ЦИАТИМ-221. Наличие тонкой пленки смазки уменьшает силы трения уплотняемой шихты о стенки пресс-форм и улучшает равномерность пропрессовки по высоте. В полость собранной пресс-формы засыпают и тщательно разравнивают навески шихты безалмазного и алмазоносного слоев. От тщательности разравнивания прессуемой массы в полости пресс-формы зависит равномерность плотности готового изделия, так как шихта алмазного слоя малоподвижна во время формования. Засыпку навески и брикетирование шихты алмазоносного слоя инструмента простой формы, например кругов АЧК и АПП, сегментов дисковых пил производят в один прием. При изготовлении некоторых инструментов, например кругов А2П и АОК, навеску делят на две части, засыпают и прессуют в два приема (рис. 81), так как иначе невозможно обеспечить равномерность плотности слоя, имеющего в местах напрессовки на корпус и в остальной части разную толщину. Вначале устанавливают пуансон *2*, засыпают часть навески шихты и прессуют ее пуансоном *4* (поз. *I*, рис. 81, *а*). Затем кольцом *8* и опорой *10* со штырями *9* извлекают пуансон *2* (поз. *I*, рис. 81, *б*). Пресс-форму переворачивают, засыпают

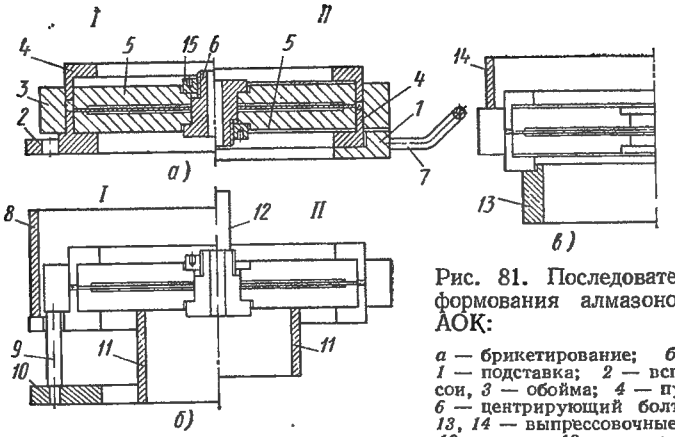


Рис. 81. Последовательность операций формования алмазоносного слоя круга АОК:

а — брикетирование; *б*, *в* — распрессовка; *1* — подставка; *2* — вспомогательный пуансон, *3* — обойма; *4* — пуансон; *5* — прижим; *6* — центрирующий болт; *7* — ручка; *8*, *11*, *13*, *14* — выпрессовочные кольца; *9* — штырь; *10* — опора; *12* — стержень для распрессовки; *15* — гайка

в образовавшуюся после удаления пуансона *2* полость вторую часть шихты и прессуют ее так же, как и первую (поз. II, рис. 81, *а*).

После засыпки шихты, разравнивания и установки пуансона пресс-форму переносят на гидравлический пресс. При перемещении верхней плиты к пуансону прикладывают силу, соответствующую расчетной. Скорость прессования практически не влияет на качество брикета. Извлеченный из пресс-формы брикет увеличивает свои размеры. Изменение размеров (упругое последствие) зависит от состава шихты, давления брикетирования, конструкции пресс-формы. Величина упругого последствия, определенная экспериментальным путем, составляет около 0,1—0,3% от размера алмазоносного слоя. Поэтому размеры формующих полостей пресс-формы для брикетирования должны быть уменьшены на эту величину по сравнению с камерой пресс-формы для горячей допрессовки. После распрессовки пресс-формы контролируют размеры и качество брикета. Не допускаются сколы, осыпавшиеся края и другие дефекты. Брикет должен быть равномерно пропрессован по всей площади. Наличие несквозных трещин допускается, так как в процессе горячей допрессовки они завариваются. Брикеты при хранении на воздухе окисляются и должны быть переданы на спекание в возможно более короткие сроки.

Спекание. Для термической обработки алмазоносный слой нагревают в контролируемой среде или на воздухе до температуры не выше (0,7—0,8) температуры плавления основного компонента шихты. Во время спекания по крайней мере один из компонентов шихты, занимающий большую часть объема, не расплавляется и брикет сохраняет форму. При спекании пористых металлических порошковых тел в результате протекания процессов диффузии, рекристаллизации, образования расплавов и т. п. происходит усадка или рост брикета. При спекании существенно повышается прочность спрессованного тела. Например, предел прочности на изгиб образцов,

изготовленных на связке М1, при 100%-ной концентрации алмазов повышается с 130 до 2000 кгс/см².

Спекание может производиться в защитной среде, на воздухе и в вакууме; наилучшие условия — в вакуумных печах. Нагрев в вакууме предотвращает окисление поверхности. При откачке воздуха и нагреве очищается поверхность металлических частиц, из которых спрессован брикет, от загрязнений, в том числе от тонких пленок жира. В высоком вакууме происходит разложение (диссоциация) окислов некоторых металлов, в результате чего обнажаются чистые поверхности. Вакуумная среда является наилучшей также для защиты алмазов от окисления и графитизации. Таким образом в вакууме обеспечиваются наилучшие условия для спекания. Вакуумное спекание, однако, малопригодно для основного варианта технологического процесса изготовления инструмента на металлической связке, включающего уплотнение при повышенной температуре. Для извлечения нагретой пресс-формы из вакуумной печи требуются сложные устройства — шлюзы. Поэтому вакуумное спекание применяют только для тех связок, которые обеспечивают достаточную прочность закрепления алмазов без уплотнения.

Рис. 82. Камерная электропечь с муфелем для спекания инструмента в защитной среде

В промышленном производстве алмазного инструмента на металлической связке в основном используют камерные или туннельные электрические печи. Высокое качество алмазоносного слоя со связкой на основе бронзы, железа и т. п. может быть получено при спекании в защитной среде, предохраняющей частицы компонентов от окисления во время нагрева. В качестве защитно-восстановительной среды используют водород или смесь азота с водородом, полученную при разложении аммиака. Для спекания в защитной среде камерные электрические печи оборудуют герметичными выдвижными муфелями из жаропрочной стали (рис. 82). Система газопроводов и приборов обеспечивает регулирование и контроль расхода и давления газов.

При спекании в защитной среде необходимо соблюдать следующую последовательность операций. После загрузки пресс-формы и герметизации муфеля полностью вытесняют воздух, находящийся в нем, азотом. Затем включают подачу водорода или диссоциированного аммиака. После проверки пробы на отсутствие «гремучего

газа» на выходе из муфеля газ поджигают. По горящему факелу контролируют подачу водорода в муфель. Обычно в муфеле поддерживается давление 150 мм вод. ст., что препятствует подсасыванию воздуха. При любых перерывах в подаче газа печь должна быть отключена, а муфель срочно заполнен азотом. В противном случае в муфель может попасть воздух и образоваться взрывающаяся «гремучая смесь». При спекании в защитной среде следует иметь в виду, что температура внутри муфеля отличается от температуры камеры печи, так как его оболочка выполняет роль экрана по отношению к нагревателям. Поэтому температура спекания измеряется термопарой, которая вводится в муфель и располагается в непосредственной близости от пресс-формы. По длине муфеля температура распределяется также неравномерно. Для каждой печи должна быть определена рабочая зона с равномерной температурой по ее длине, в которой и размещают пресс-формы.

Процесс спекания значительно упрощается, когда в качестве основы связки используют алюминий. В этом случае для спекания не требуется защитная среда и камерные печи могут быть использованы без переоборудования. Особенность процесса спекания алмазоносного слоя на металлической связке заключается в том, что нагрев при спекании производят в пресс-формах для уплотнения. Основные схемы конструкций этих пресс-форм показаны в табл. 40. При подготовке к спеканию детали пресс-формы обезжиривают и покрывают тонким слоем смазки, например, коллоидно-графитовым препаратом (ГОСТ 5245—50). Тонкая пленка графита, остающаяся на поверхности после высыхания смазки, предотвращает припекание алмазоносного слоя к деталям пресс-форм. В полость пресс-формы укладывают брикет алмазоносного слоя и корпус (табл. 40, поз. 1—3) или переходное кольцо (табл. 40, поз. 4), поверхность которых покрыта гальваническим путем тонким (10—15 мкм) слоем меди и тщательно очищена от загрязнений. Собранную пресс-форму помещают в печь и нагревают до температуры спекания. Температура спекания определяется составом связки и, как правило, равна 500—830° С. Для алюминиевых связок температура близка к нижнему пределу, для связок на основе кобальта и железа — к верхнему.

Для равномерного прогрева и полного протекания процессов спекания во всем объеме алмазоносного слоя производят изотермическую выдержку при максимальной температуре нагрева. Время выдержки в зависимости от размера пресс-формы изменяется от 1 до 3 ч. После выдержки пресс-формы извлекают из печи и устанавливают на гидравлический пресс для уплотнения. Если спекание производят в защитной среде, перед извлечением пресс-форм муфель заполняют азотом до полного вытеснения водорода или диссоциированного аммиака.

Уплотнение является одной из важнейших операций, во многом определяющей прочность удержания алмазов, точность формы и надежность соединения алмазоносного слоя с корпусом. Выполняют уплотнение в одноместных (табл. 40, поз. 1—3; 5—9) или многоместных (табл. 40, поз. 4) пресс-формах. Конструктивно

пресс-формы для уплотнения существенно отличаются от пресс-форм для прессования. Как правило, формующие их полости образуются несколькими составными деталями, прочно соединенными после сборки конусными обоймами или клиньями. Такая конструкция наиболее приемлема в условиях воздействия высоких температур и спекания. При разборке пресс-формы для извлечения изделия клиновое соединение имеет большие преимущества перед любыми другими, например резьбовыми. После ослабления клинового соединения детали пресс-форм легко разбираются и изделие освобождают без выпрессовки, которая неизбежно приводит к задирам на поверхности пресс-формы.

Детали, образующие формующую полость пресс-форм, изготовляют из жаропрочных сплавов на основе никеля и хрома, выдерживающих при температуре до 850° С давление 2000 кгс/см^2 без существенных деформаций. При изготовлении инструмента на связках с алюминиевой основой, для которых температура спекания и давление уплотнения ниже, чем на бронзовых, могут быть использованы менее дефицитные материалы. Применение нежаропрочных материалов нежелательно, так как при высоких давлении уплотнения и температуре детали быстро выходят из строя.

В результате уплотнения при повышенной температуре получают практически беспористый алмазоносный слой. Степень уплотнения оказывает решающее влияние на физико-механические свойства алмазоносного слоя. Если после спекания прочность на изгиб материала связки М1 составляет 2000 кгс/см^2, то после уплотнения она возрастает до 3000 кгс/см^2. Необходимая сила для уплотнения

$$P = pF,$$

где p — давление уплотнения в кгс/см^2;
F — площадь прессования в см^2.

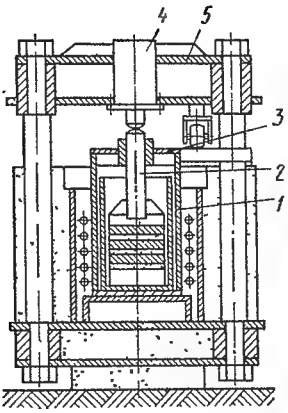
Давление для уплотнения различных связок находится в пределах 600—1500 кгс/см^2. Меньшее давление применяется при изготовлении инструмента на связках с алюминиевой основой, большее — на железной, кобальтовой и т. п. Для связки М1 давление составляет 750 кгс/см^2. Уплотнение производят «до упора». Усилие пресса должно быть в этом случае примерно в 1,5 раза больше расчетного. Во время спекания и уплотнения происходит прочное соединение алмазоносного слоя с корпусом или переходным элементом за счет процессов диффузии. Алмазоносный слой после уплотнения охлаждают в пресс-формах под давлением до температуры 200—300° С, что предотвращает коробление инструмента из-за внутренних напряжений, возникающих при неравномерном остывании. После охлаждения пресс-форму разбирают и извлекают изделие.

Контроль качества. После операций спекания и уплотнения контролируют качество изделия. Проверяют, как правило, геометрические размеры, твердость алмазоносного слоя и прочность соединения его с корпусом или промежуточным кольцом. Геометрические размеры измеряют универсальными или специаль-

ными инструментами и приборами, обеспечивающими требуемую точность. Важной характеристикой алмазоносного слоя является твердость, которая комплексно характеризует качество выполнения операций. Твердость зависит от состава связки, пористости алмазоносного слоя, качества выполнения процессов спекания и уплотнения. Чем больше пористость при неизменном составе связки, тем ниже твердость и наоборот. Заниженная температура спекания, недостаточное давление горячей допрессовки и другие отклонения от режимов технологического процесса приводят к снижению твердости алмазоносного слоя и прочности удержания алмазов, к увеличению износа инструмента в процессе эксплуатации. Твердость алмазоносного слоя на металлической связке измеряют на твердомере ТК-2 по шкале В. Наконечником служит стальной закаленный шарик диаметром 1,588 мм. Твердость определяется как среднеарифметическое значение нескольких (3—5) замеров, выполненных в точках, равномерно расположенных на поверхности алмазоносного слоя. Твердость алмазоносного слоя мало изменяется с изменением концентрации, зернистости и марки алмазов. Поэтому в качестве контрольного значения твердости алмазоносного слоя может быть принята та же величина, что и для связки. Алмазоносный слой подвергается также визуальному контролю. На поверхности его не допускаются трещины, сколы и раковины.

Новое в производстве инструмента на металлической связке. Несмотря на широкое распространение, технологический процесс изготовления инструмента путем спекания в камерных печах с последующим уплотнением в нагретом состоянии имеет существенные недостатки: используемая оснастка сложна по конструкции, изготовляется из труднообрабатываемых жаропрочных сплавов, имеет низкую стойкость. Периодические операции загрузки пресс-форм в печь и выгрузки, а также установка на гидравлический пресс для уплотнения не механизированы. В процессе переноски нагретой пресс-формы из печи к прессу она остывает. Вследствие этого трудно обеспечить точную температуру уплотнения, что необходимо для получения качественного слоя.

Из сказанного ясно, что совершенствование технологического процесса изготовления инструмента на металлической связке является актуальной задачей. С этой целью на заводах улучшают оснастку и оборудование, разрабатывают новые технологические схемы изготовления инструмента с использованием прокатки, гидростатического прессования и спекания под давлением. Например, на Львовском заводе алмазного инструмента, который специализируется на выпуске алмазных брусков, механизированы операции перемещения пресс-форм во время нагрева, изотермической выдержки и уплотнения. Для термической обработки используют туннельную печь с механическим продвижением пресс-форм. Пресс-формы по мере продвижения в канале печи нагреваются. Темп движения и распределение температуры по зонам обеспечивают заданный режим нагрева и изотермической выдержки. Через определенное время пресс-форма выталкивается из печи и по рольгангу передается на



а)

б)

Рис. 83. Печь для спекания под давлением:

а — схема; *б* — общий вид

уплотнение. Применение туннельных печей значительно повышает производительность операций спекания и уплотнения, способствует получению стабильного качества изделий. Однако в таких печах трудно обеспечить защиту от окисления.

Лишена этого недостатка пресс-печь, показанная на рис. 83. Пресс-форму загружают в герметичный муфель *1*. Давление к пуансону прикладывают через шток *2*, проходящий в отверстие в центре крышки *3*. Шток перемещается поршнем гидроцилиндра *4*, который закреплен в поворотной траверсе *5*. Автоматическая насосная установка поддерживает постоянное давление в течение всего времени спекания. Таким образом в течение всего цикла нагрева, изотермической выдержки и охлаждения пресс-формы к алмазоносному слою прикладывается давление, что улучшает условия уплотнения материала. После окончания цикла траверса *5* отводится в сторону, освобождая доступ к муфелю для извлечения пресс-форм.

Высокие физико-механические свойства материалов получают в этом случае при давлениях, в 5—10 раз меньших, чем при спекании в камерных печах с последующим уплотнением. Например, для связки М1 давление при спекании 75—100 кгс/см^2 достаточно для получения той же твердости, что и при спекании с последующим уплотнением давлением 700 кгс/см^2. Нагрев, выдержка и охлаждение при спекании под давлением производятся в контролируемых в течение всего цикла условиях, что обеспечивает стабильность качества инструмента. Уменьшение давления, нагружающего детали пресс-форм при повышенной температуре, повышает размерную их стойкость. При этом становится возможным использование упрощенных пресс-форм. Схема такого технологического процесса пока-

Рис. 84. Изготовление алмазного инструмента на металлической связке без применения специальных пресс-форм:

а — прессование и уплотнение; *б* — удаление припусков; *в* — шлифование торца корпуса; *г* — шлифование алмазоносного слоя; *1* — пуансон; *2* — корпус—пресс-форма; *3* — алмазоносный слой

зана на рис. 84. Полость для засыпки шихты алмазоносного слоя *3* выполняют в корпусе *2* инструмента, и изготовляют из жаропрочной стали только пуансон *1*. После формования и уплотнения припуски на корпусе удаляют на металлорежущих станках. Объем механической обработки корпуса несколько увеличивается, однако это окупается существенным сокращением удельных затрат на пресс-формы. В установках спекания под давлением целесообразно изготовлять изделия с большой площадью алмазоносного слоя, сложнофасонные алмазные зубчатые хоны для обработки зубчатых колес, тонкие отрезные диски и др.

При формовании изделий с большой площадью алмазоносного слоя процесс брикетирования с использованием пресс-форм трудно осуществим. Простой подсчет показывает, что для брикетирования инструмента на связке М1 площадью слоя 200 см^2 требуется пресс усилием не менее 600 тс. Значительно возрастает и трудоемкость разравнивания. Поэтому для формования деталей с большой площадью алмазоносного слоя применяют способ прокатки алмазосодержащей шихты (рис. 85). При прокатке из шихты *2*, засыпанной в бункер *1*, в зазоре между вращающимися валками *4* формуется лента *5*, из которой вырезаются заготовки для последующего спекания. Толщина ленты регулируется заслонкой *3*. Отходы подвергают перетирке и повторной прокатке. Таким же образом могут быть

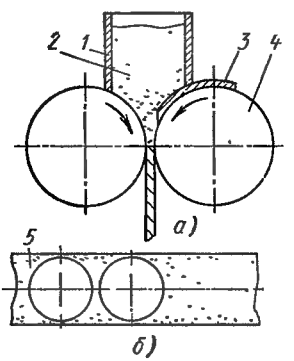


Рис. 85. Схема прокатки алмазоносного слоя:

а — формование; *б* — вырезка заготовки

изготовлены секторы для оснащения плоских притиров любого диаметра. Плотность и твердость алмазоносного слоя при изготовлении из проката получают равномерными по всей площади изделия.

Процесс прокатки имеет большие преимущества перед прессованием: исключается необходимость применения пресс-форм, обеспечивается высокая степень равномерности толщины и плотности, недостижимая из-за трудностей разравнивания и малой текучести шихты при прессовании, площадь прокатываемых изделий практически не ограничивается, а размеры лимитируются только по ширине длинной рабочей бочки валка, значительно уменьшаются затраты энергии, снижается требуемая мощность и масса оборудования.

Виды брака. Основными видами брака при изготовлении алмазоносного слоя инструмента на металлической связке являются заниженная или неравномерная твердость, раковины, неравномерное распределение алмазов, отслаивание и коробление рабочего слоя. Заниженная твердость алмазоносного слоя может быть вследствие недостаточной температуры нагрева при спекании, меньшего удельного давления горячей допрессовки при прессовании «по давлению», неправильного расчета объема камеры при прессовании «до упора». Этот вид брака может быть также следствием неправильного соотношения компонентов связки. При заниженной твердости алмазоносного слоя снижается его износостойкость и долговечность работы. В некоторых случаях брак по твердости может быть исправлен повторением операций спекания и горячей допрессовки, однако, как правило, устранить этот дефект не удается. Поэтому необходимо в течение всего цикла изготовления алмазоносного слоя следить за тщательностью соблюдения технологического процесса. Неравномерная твердость алмазоносного слоя по площади объясняется неравномерностью разравнивания шихты, или наличием в ней комков из-за некачественного смешивания. При горячей допрессовке в этом случае образуются участки, имеющие меньшую твердость. Неравномерность твердости по высоте алмазоносного слоя, например кругов для бесцентрового шлифования, может быть объяснена заниженным удельным давлением горячей допрессовки, неравномерным по высоте прогревом пресс-формы, неправильным выбором ее конструкции.

Раковины на поверхности алмазоносного слоя появляются из-за загрязнения шихты. При недостаточно тщательном обезжиривании или при излишней толщине слоя смазки ее частицы при перемещении пуансона попадают на алмазоносный слой, из-за чего на поверхности образуются отпечатки. Неравномерное распределение алмазов является причиной неравномерного износа инструментов в процессе эксплуатации. Чтобы избежать этого недостатка, необходимо следить за тщательностью приготовления шихты алмазоносного слоя. Нельзя допускать длительного хранения шихты алмазоносного слоя и высыхания увлажнителя, так как в сухой шихте происходит расслоение алмазов и связки в процессе засыпки.

При изготовлении инструмента на бронзовых связках некачественная подготовка поверхности контакта корпуса с алмазоносным слоем, загрязнение ее и спекание без защитной среды приводят к снижению прочности крепления слоя к корпусу и его отслаиванию. Следует тщательно очищать омедненную поверхность корпуса, промывая ее последовательно бензином и ацетоном и протирая перед укладкой в пресс-форму спиртом. Деформация алмазоносного слоя после спекания происходит вследствие разных коэффициентов расширения материала корпуса и слоя. Небольшое коробление может быть устранено путем рихтовки, которую производят при окончательной обработке инструмента. В тех случаях, когда по каким-либо причинам в результате изготовления полу́чен неисправимый брак, производят рекуперацию алмазов из алмазоносного слоя.

Изготовление алмазоносного слоя методом гальванотехники. Для закрепления зерен алмазов используют гальванические ванны, заполненные электролитом, в которые погружены анод и катод, подсоединенные к источнику постоянного тока. Как правило, анод изготовляют из никеля, а в качестве катода используют корпус инструмента, на поверхности которого расположены зерна алмазов. При пропускании постоянного электрического тока через электролит, содержащий водные растворы солей никеля, происходит их диссоциация на анионы и катионы. Ионы никеля перемещаются к катоду и, разряжаясь, превращаются в нейтральные атомы. Через определенное время тонкий слоя никеля, появившийся на катоде, прочно закрепляет частицы алмаза на корпусе инструмента. В качестве источника тока применяют выпрямительные установки различных типов напряжением 8,12 и 24 В. Ток в цепи гальванической ванны регулируют ползунковыми реостатами или трансформатором напряжения, включенным в первичную цепь выпрямителя. Изменяя ток и длительность выдержки, можно регулировать толщину получаемого слоя металла и величину выступающих вершин алмазов. По закону Фарадея количество металла, осаждающегося на поверхности катода, пропорционально плотности тока и времени осаждения.

Катодная плотность тока

$$D_к = \frac{I}{S},$$

где I — сила тока в цепи в А;

S — площадь изделия в дм^2.

При прочих равных условиях, чем больше плотность тока, тем быстрее происходит осаждение металла. Однако имеется предел, при превышении которого вместо плотных мелкокристаллических осадков получают губчатый непрочный слой металла, к тому же плохо сцепляющийся с поверхностью корпуса. Чтобы избежать этого, плотность тока в никелевых электролитах ограничивают. Методом электрохимического осаждения получают, как правило, однокомпонентные связки, хотя возможно и совместное осаждение сплавов металлов. Чаще всего связкой служит никель, дающий при

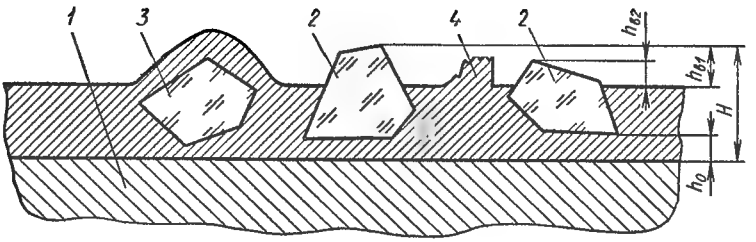


Рис. 86. Однослойное алмазно-никелевое покрытие

осаждении прочные, хорошо сцепленные с корпусом осадки. Инструмент, изготовленный гальваническим методом, обладает более высокой режущей способностью по сравнению с изготовленным методом порошковой металлургии. Частицы порошка алмаза прочно удерживаются в твердой металлической связке, а режущие вершины выступают над ней. Существуют методы гальваностегии и гальванопластики. В первом случае тонкие алмазосодержащие покрытия прочно соединяются с металлическим корпусом во время осаждения. Методы гальванопластики используют для получения осадков, отделяемых от катода, например, для копирования сложной формы изделий, таких как правящие ролики, шеверы и др.

Изготовление инструмента методом гальваностегии. Методы гальваностегии применяются при изготовлении широкой номенклатуры алмазных инструментов: отрезных дисков с внутренней режущей кромкой толщиной до 0,4 мм для резки полупроводниковых материалов, надфилей для обработки твердых сплавов, шлифовальных кругов и головок малого диаметра, отрезных кругов для резки рубина и сапфира, плоских и фасонных притиров и т. д. Во всех случаях на рабочую часть корпуса наносится и прочно соединяется с ним однослойное или многослойное алмазно-никелевое покрытие. Схема строения однослойного покрытия показана на рис. 86. На корпусе *1* закреплены в слое гальванически осажденного никеля зерна алмазов *2*. Вершины большинства зерен выступают над поверхностью покрытия на величины $h_{в1}$ и $h_{в2}$, которые зависят от размера зерна и глубины залегания его в слое. Некоторые зерна (например, *3*) расположены под слоем никеля. На поверхности гальванического покрытия иногда наблюдаются нежелательные наросты металла — дендриты *4*. Общая высота покрытия H зависит от толщины промежуточного безалмазного слоя h_o, величины зерен, их расположения и других факторов. Расчеты величины H при закреплении шлифпорошков алмазов можно произвести по формуле Прудникова Е. Л.:

$$H = a + ma,$$

где a — размер ячейки сита, на котором задерживаются зерна алмазов основной фракции, в мкм;

m — коэффициент, учитывающий прирост толщины слоя в зависимости от условий изготовления.

Коэффициент m приближенно можно определить по формуле

$$m = \frac{10{,}15}{\sqrt{a}}.$$

По известной толщине алмазно-никелевого покрытия определяют исполнительные размеры рабочей части корпусов кругов. Количество алмазов, закрепленных в однослойном алмазно-гальваническом покрытии,

$$A = \eta S,$$

где $\eta = 0{,}2 \div 0{,}3$ — количество алмазов в каратах, закрепленное на единице поверхности, в карат/см^2;

S — общая площадь покрытия в см^2.

В некоторых случаях фактическое содержание алмазов, закрепленных на рабочей поверхности, можно определить по разности массы алмазов, загруженных в ванну до покрытия и после него.

Работоспособность инструмента, изготовленного методом гальваностегии, определяется прочностью сцепления алмазоносного слоя с корпусом, равномерностью распределения алмазного порошка на рабочей поверхности, толщиной слоя связки и прочностью удержания зерен. При изготовлении инструмента выполняют следующие операции: изготовление корпуса, подготовку корпуса к покрытию, очистку алмазов от примесей, нанесение алмазоносного слоя, контроль качества и упаковку (рис. 87). Высокое качество инструмента может быть получено только при тщательном выполнении всех операций технологического процесса. Корпуса инструмента изготовляют из конструкционной стали. Когда при малых размерах инструмента требуется высокая жесткость, например при изготовлении слесарных надфилей, корпус может быть изготовлен и из закаленной инструментальной стали У10, У12 и т. п. Для корпусов отрезных дисков с внутренней режущей кромкой используют тонкую бронзовую или стальную фольгу. Корпуса, как правило, изготовляют с окончательными размерами без припусков. Только размеры рабочих поверхностей, на которых закрепляют алмазы, занижают на толщину покрытия H (см. рис. 86). На корпусах не должно быть резких переходов, острых незакругленных углов, на которых нарастают дендриты. Подготовка корпуса к нанесению покрытия включает операции тщательной очистки поверхности от жировых пленок, окислов и других загрязнений. Это обеспечивает прочное сцепление алмазно-никелевого слоя с корпусом.

Операции обезжиривания, травления, декапирования для удаления окислов и промывку в проточной холодной и горячей воде выполняют в специальных ваннах. Например, обезжиривание может быть выполнено растворением жировых пятен и пленок в смеси кислот или электрохимическим методом. Стальные корпуса, например, обезжиривают в электрохимической ванне, в которую вводят тринатрийфосфат (40—60 г/л), едкий натр (10—30 г/л), кальцинированную соду (40—60 г/л) и другие добавки. При плотности тока 8—10 А/дм^2, выдержке на катоде в течение 8—10 мин и на

аноде, 2—4 мин поверхность полностью очищается от загрязнений. Чтобы удалить окислы с поверхности стальных корпусов, в течение 8—10 мин производят химическое травление в ванне, в которой содержится смесь серной (75 г/л) и соляной (125 г/л) кислот. Электролитическое травление может быть выполнено в ванне из серной кислоты плотностью 1,6 г/см³ с добавкой глицерина. На каждый литр кислоты добавляют 10 мл глицерина. При травлении в таких ваннах деталь выдерживают на катоде в течение 1—2 мин при плотности тока 10—15 А/дм². При длительном хранении корпусов перед нанесением покрытия их подвергают декапированию для удаления тончайших пленок окислов. С этой целью деталь опускают в соляную кислоту и выдерживают в ней 20—40 с. После каждой операции корпуса тщательно промывают в проточной воде.

Перед нанесением алмазоносного слоя алмазы очищают от примесей. Это необходимо для полного удаления токопроводящих примесей (графита, металла-катализатора) с поверхности алмазов и ча-

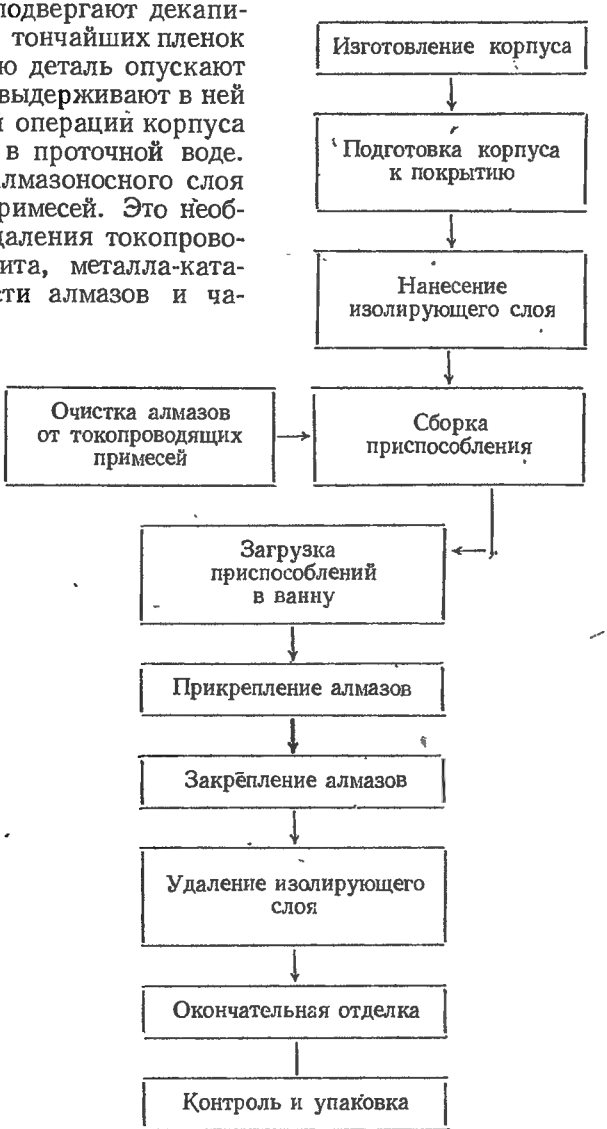


Рис. 87. Технологическая схема изготовления инструмента методом гальваностегии

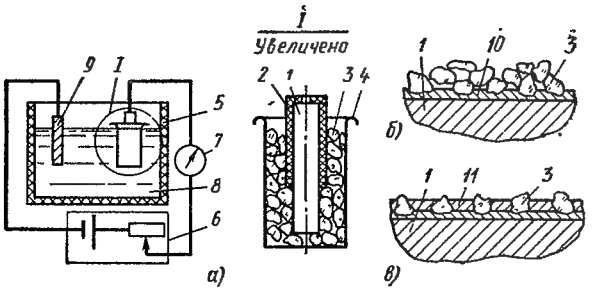


Рис. 88. Нанесение алмазоносного слоя электрохимическим методом:

а — схема гальванической ванны; *б* — прикрепление алмазов; *в* — закрепление алмазов; *1* — корпус инструмента; *2* — защитный слой ила; *3* — зерна алмазов; *4* — корзинка из кислотостойкой ткани; *5* — электролитическая ванна; *6* — источник постоянного тока; *7* — амперметр; *8* — электролит; *9* — анод; *10* — слой никеля, прикрепляющий алмазы; *11* — слой никеля, закрепляющий алмазы

стиц металла, попавших в порошок, на которых в процессе электролиза могут нарастать дендриты. Очищают алмазы следующим образом. Порошок кипятят в «царской водке» и промывают холодной водой. Затем алмазы обрабатывают хромовой смесью для удаления частиц графита, которые также проводят электричество. Хромовую смесь приготовляют смешиванием 10 г двухромокислого калия с 20 мл воды с последующим добавлением двойного объема серной кислоты плотностью 1,84 г/см^3. Для обработки алмазы нагревают в хромовой смеси в течение 10—15 мин, не допуская полного удаления воды. После обработки хромовой смесью порошок для нейтрализации кислоты кипятят в насыщенном растворе едкого натра в течение 30 мин и снова промывают холодной водой. Обработка заканчивается выдержкой алмазов в течение 2 ч в 20%-ном растворе серной кислоты с последующей тщательной промывкой водой. Алмазные порошки хранят в корзинке из кислотостойкой ткани в 1%-ном растворе серной кислоты. Описанную выше обработку производят перед использованием каждой новой партии порошка. Периодически таким же образом обрабатывают алмазные порошки, находящиеся в ваннах.

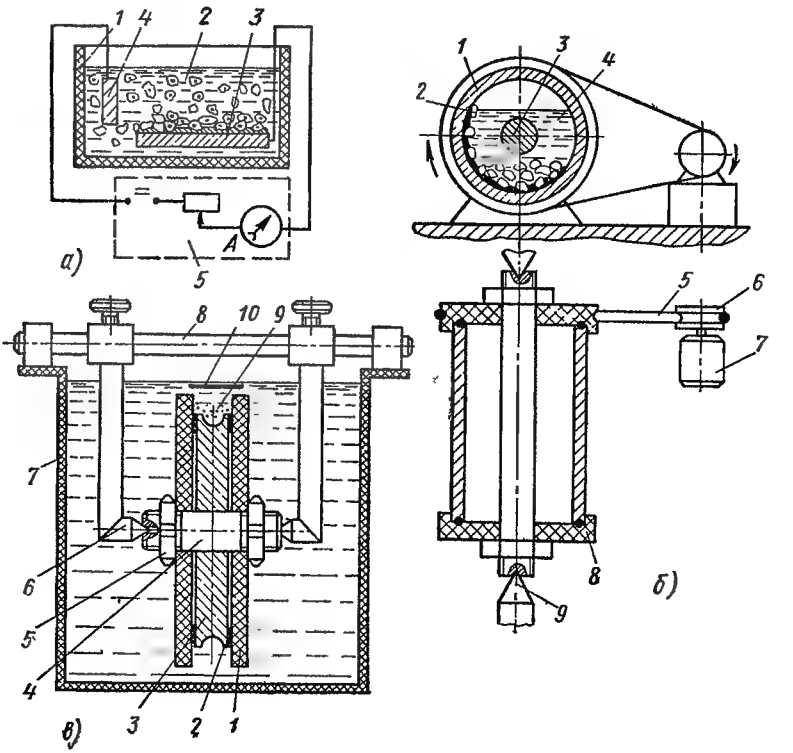
Алмазоносный слой наносят на поверхность инструмента в два этапа в гальванической ванне, схема которой показана на рис. 88, *а*. Предварительно (рис. 88, *б*) на подготовленную поверхность корпуса *1*, на которой удерживаются закрепляемые зерна алмазов *3*, осаждается слой никеля *10*, толщиной примерно $^1/_5$ размера зерен основной фракции, что достаточно для прикрепления одного слоя алмазов. Затем изделие переносят в другую ванну, в которой слой никеля *11* наращивается настолько, чтобы не менее $^2/_3$ высоты зерен основной фракции порошка были закреплены в металле (рис. 88, *в*). Первый этап может быть назван прикреплением алмазов, второй — закреплением. Обе операции выполняются в никелевых электролитах в гальванических ваннах.

Техника выполнения операции прикрепления зависит от размеров и конфигурации поверхности корпуса. В общем случае по этим признакам инструменты могут быть разделены на две группы: с рабочей поверхностью, образованной плоскостями (плоские круги, ромбовидные надфили и т. п.); с фасонной цилиндрической, конус-

ной и т. п. рабочей поверхностью (барабаны для обработки обуви, притиры и т. д.). Рабочая поверхность инструмента может быть образована также сочетанием цилиндрических, плоских и фасонных поверхностей. Например, при изготовлении отрезных кругов алмазы закрепляются как на боковых плоских поверхностях, так и на цилиндрической части корпуса. Прикрепление алмазов к плоским поверхностям может быть осуществлено следующим образом (рис. 89, *а*). В ванну с электролитом *2*, в которой установлен корпус *3*, засыпают алмазы в количестве 10—15 каратов на 1 л раствора. Затем электролит интенсивно перемешивают до равномерного распределения алмазов по всему объему ванны. Частицы алмазов оседают под действием силы тяжести на корпус и одновременно с этим прикрепляются к нему слоем растущего никеля. Время покрытия подбирают так, чтобы прикреплялся только один слой оседающих частиц.

Рис. 89. Технологические схемы прикрепления алмазных зерен к корпусу:

а — при оседании зерен из электролита; *1* — ванна электролитическая; *2* — электролит, перемешанный с алмазами; *3* — корпус; *4* — анод; *5* — источник постоянного тока; *б* — во вращающемся барабане: *1* — корпус; *2* — зерна алмазов; *3* — центральный анод; *4* — электролит; *5* — ременная передача; *6* — шкив; *7* — электродвигатель с редуктором; *8* — крышка; *9* — центр; *в* — на наружной цилиндрической поверхности: *1* — фланцы; *2* — резиновые прокладки; *3* — корпус круга; *4* — ось; *5* — гайка; *6* — центрирующий конус; *7* — ванна; *8* — штанга; *9* — алмазный порошок; *10* — анод



На цилиндрических поверхностях зерна алмазов могут удерживаться в незакрепленном состоянии только под действием силы трения.

Эта сила незначительна, и только при большом радиусе кривизны поверхности корпуса частицы могут быть прикреплены к ней без использования приспособлений. Например, на внутренних цилиндрических поверхностях гильз, используемых для притирки поршневых колец диаметром 60 мм и более, алмазы прикрепляют во вращающемся приспособлении с центральным анодом. Гильзу устанавливают в приспособление (рис. 89, *б*), внутрь которого засыпают порошок алмаза и заливают электролит. При малой частоте вращения приспособления (0,05—0,125 об/мин) частицы алмаза, удерживаемые некоторое время неподвижно относительно поверхности за счет сил трения, успевают прикрепиться к поверхности. Общее время выполнения операции прикрепления в этом случае соответствует времени поворота барабана на 360°. Для закрепления алмазов на наружной цилиндрической поверхности, диаметр которой больше 40—50 мм, корпус инструмента помещают в ванну с электролитом (рис. 89, *в*). Зерна оседают на поверхность, где они закрепляются, после взмучивания находящегося в ванне порошка или наносятся на определенный участок с помощью специального засыпного приспособления. После прикрепления на этом участке алмазов корпус поворачивают на небольшой угол и повторяют описанные выше операции до полного покрытия всей рабочей поверхности инструмента.

Если алмазы должны быть закреплены на цилиндрических и фасонных поверхностях с малым радиусом кривизны, на которой зерна не могут быть удержаны в покое силами трения, то применяют специальный прием, показанный на рис. 88, *а*. Подготовленный порошок алмазов засыпают в корзинки из кислотоупорной ткани, натянутой на проволочный каркас. После этого корзинку с алмазами опускают в ванну с электролитом. Часть корпуса, на котором должны быть закреплены алмазы, погружают в толщу порошка. Ионы никеля, проходя через ткань и слой алмазов к катоду, кристаллизуются на нем, в результате чего к корпусу прикрепляются только те зерна, которые находятся в непосредственном контакте с его поверхностью. После прикрепления одного слоя зерен корпус извлекают из ванны и закрепляют зерна более толстым слоем никеля в другой ванне. Толщина слоя алмазов между стенками корзинки и корпуса должна быть как можно меньшей. При большой толщине слоя увеличивается количество алмазов, потребное для единовременной загрузки в ванну, ухудшаются условия поступления электролита к поверхности корпуса, увеличивается время закрепления алмазов. На практике толщину слоя алмаза ограничивают размером 3—10 мм.

Для прикрепления алмазов используют электролит, применяемый для матового никелирования. Его получают растворением в дистиллированной воде 300 г/л сернокислого никеля и равного количества (по 30 г/л) хлористого никеля и борной кислоты. Сернокислый никель является основным компонентом, и концентрация

его определяет максимальную плотность тока. Хлористый никель вводят для улучшения электропроводности электролита и уменьшения хрупкости осадков. Борная кислота стабилизирует кислотность раствора, улучшает блеск и пластичность осадков. Осаждение никеля для прикрепления алмазов производят в подогретом до 50—60° С электролите. Существенное влияние на скорость осаждения никеля, плотность и прочность осадка, прочность сцепления слоя с корпусом оказывает кислотность электролита, которая определяется содержанием в растворе водородных ионов. Принято кислотность электролита измерять в единицах pH. Для никелевых электролитов кислотность регулируют добавлением серной кислоты, или едкого натра, так чтобы величина pH была в пределах 4,7—5. Катодная плотность тока при прикреплении алмазов в зависимости от зернистости алмазов принимается равной 0,6—1 А/дм^2.

Малая плотность тока обеспечивает высокое качество осадков. При прикреплении в ванне для матового никелирования вначале высаживают на поверхности тонкий слой никеля в течение 10—15 мин, а затем на эту поверхность прикрепляют алмазные зерна. Время прикрепления шлифпорошков алмазов может достигать нескольких часов. Поэтому рекомендуется использовать для прикрепления многоместные приспособления.

После прикрепления алмазов корпус промывают и переносят в ванну или приспособление для нанесения слоя никеля, заращивающего прикрепленные частицы на заданную высоту. Процесс осаждения регулируют так, чтобы толщина слоя металла была не менее $^2/_3$ среднего линейного размера зерен основной фракции. Для закрепления применяют электролит блестящего никелирования. В электролит блестящего никелирования помимо сернокислого (300 г/л) и хлористого (30 г/л) никеля, а также борной кислоты (30 г/л), которые применяются в электролитах матового никелирования, вводят дополнительно для улучшения блеска покрытия кумарин (1 г/л), паратолуолсульфамид (2 г/л) и формалин (0,02 г/л). Для снижения поверхностного натяжения электролита в него добавляют моющее средство «Прогресс». При закреплении алмазов кислотность электролита поддерживается в пределах pH 4,7—5. Катодная плотность тока регулируется таким образом, чтобы она не превышала 2 А/дм^2, так как медленное осаждение дает плотный слой никеля, прочно удерживающий частицы алмазов. Температура ванны поддерживается в пределах 40—60° С. Чтобы обеспечить изготовление качественного инструмента, периодически проверяют состав электролитов и при необходимости корректируют кислотность или меняют электролит полностью. Выпадающие в процессе работы в электролите механические примеси удаляют фильтрованием. Для защиты электролита от механических примесей, выделяющихся при растворении анода, анод обшивают плотной кислотостойкой тканью.

Нерабочие поверхности инструмента, на которые алмазоносный слой не наносится, изолируют от контакта с электролитом. Например, при изготовлении фасонных инструментов корпус *3* зажимают

между токонепроводящими пластинами из органического стекла *1* с уплотняющими резиновыми прокладками *2* (см. рис. 89, *в*), что исключает попадание зерен алмазов *9* и электролита на нерабочую поверхность корпуса. Во многих случаях часть поверхности корпуса, на которую не наносят алмазы, после травления в венской извести, обезжиривания и предварительного никелирования покрывают слоем нитроклея АК-20 (ТУ МХП-720—41). Клей хорошо сцепляется с поверхностью металла и образует при высушивании плотные беспористые пленки, которые изолируют корпус от контакта с электролитом и предохраняют поверхность от высаждения на ней слоя никеля во время прикрепления алмазов.

После закрепления алмазно-никелевого покрытия на рабочей части корпуса защитный лак удаляют в ванне электролитического обезжиривания. При большой силе тока образующиеся на поверхности корпуса водородные пузыри срывают пленку лака. Лак может быть удален и другими методами, например шлифованием. После удаления лака корпус с закрепленным на нем алмазоносным слоем полностью никелируют. При контроле инструментов, изготовленных методом гальваностегии, проверяют прочность сцепления алмазоносного слоя с корпусом, равномерность распределения зерен алмазов на рабочей поверхности, отсутствие дендритов и толщину слоя. Прочность сцепления с корпусом определяется, например, путем царапания слоя стальным закаленным ножом. При определенной силе нажима слой не должен отделяться от корпуса. Для отправки потребителю инструмент упаковывают в пластмассовые коробки, деревянные ящики, чехлы из полиэтилена и т. п.

Изготовление инструмента методами гальванопластики. В технологии электрохимии процессы гальванопластики применяются для воспроизведения форм предметов, получения полых изделий и т. д. В общем случае процесс гальванопластики включает операцию нанесения покрытия с последующим отделением его от катода. Катоды могут быть многократно используемые и разовые. Первые изготавливают из нержавеющей стали или никеля. На поверхность катодов наносят разделительный электропроводный слой, который облегчает затем съем изделия с катода. Многократно используемые катоды применяют только в том случае, когда изделия имеют простую форму, например, при изготовлении трубчатых сверл, плоских пластинок и т. п. Инструменты сложного профиля изготовляют с использованием разовых катодов. Такие катоды делают из легкоплавких и алюминиевых сплавов, пластмасс и др. После нанесения покрытия на разовые катоды их растворяют или выплавляют.

При изготовлении алмазного инструмента методы гальванопластики используются значительно реже, чем методы гальваностегии. Однако гальванопластика используется для получения сверл, правящих роликов сложного профиля, высокоточных, плоских и фасонных алмазосодержащих пластин и иных инструментов, которые не могут быть изготовлены другими методами. Технология изготовления инструментов методом гальванопластики может быть

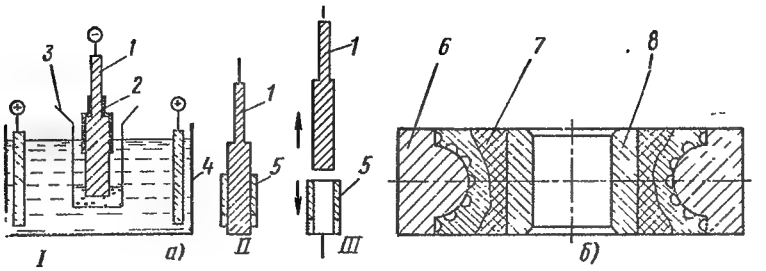


Рис. 90. Схемы изготовления инструмента методом гальванопластики:

а — изготовление сверл: *I* — схема гальванической ванны; *II—III* — отделение трубки от промежуточного катода; *б* — изготовление правящих роликов; *1* — катод; *2* — защитный слой клея; *3* — корзинка из кислотостойкой ткани с алмазами; *4* — гальваническая ванна; *5* — трубка; *6* — алюминиевое кольцо; *7* — промежуточный слой; *8* — втулка

рассмотрена на примере изготовления трубчатых сверл, применяемых для сверления неметаллических материалов, таких как стекло, кварц и др. (рис. 90, *а*). Небольшая толщина режущей кромки, которая может быть получена в этом случае, необходима для обеспечения малых сил резания.

Сверло состоит из прикрепленной к корпусу трубки, изготовленной методом гальванопластики. Трубка по длине делится на два участка, в одном из них — рабочем — содержатся алмазы. Для получения трубки используют круглый катод *1* из нержавеющей стали. Так как при изготовлении инструментов методом гальванопластики не требуется прочного сцепления алмазоносного слоя с основой, процесс подготовки поверхности упрощается и подготовительные операции сводятся к обезжириванию ацетоном и обработке поверхности венской известью. В качестве разделительного слоя на поверхность катода наносят гальваническую медь или олово. Торцовые и часть цилиндрического участки катода защищают слоем *2* нитроклея АК-20. Подготовленный таким образом катод погружают в корзинки *3* из кислотоупорной ткани с алмазами на глубину, соответствующую высоте алмазосодержащего участка трубки. Затем катод вместе с корзинкой опускают в ванну *4* с электролитом (*I*), где одновременно происходит нанесение алмазов и образование безалмазного слоя, служащего затем для соединения с корпусом сверла. После прикрепления слоя алмазов их заращивают в другой ванне никелем. Для закрепления, так же как и для прикрепления, можно использовать электролиты матового никелирования. Последовательно повторяя операции прикрепления и закрепления, доводят толщину режущей части сверла до требуемой (*II*). Полученную трубку *5* снимают (*III*) с катода и припаивают затем к хвостовику.

Метод гальванопластики может быть использован для изготовления инструмента сложного профиля, например правящих роликов, к точности которых предъявляют повышенные требования (рис. 90, *б*). Предварительно изготовляют, например, из алюминия кольцо *6*, внутренняя поверхность которого соответствует форме ролика.

Затем на эту поверхность осаждают методом гальванопластики алмазоносный слой, устанавливают стальное кольцо *8* и в полученную полость заливают твердеющую композицию *7*. Затем наружное кольцо из алюминия растворяют в щелочи. Таким образом получают очень точные правящие ролики.

Основные виды брака при изготовлении инструмента с электролитическим закреплением алмазов: неравномерное распределение зерен алмазов на поверхности рабочего слоя, непрочное соединение слоя с корпусом и дендритные наросты никеля. Чтобы избежать неравномерного распределения зерен, необходимо тщательно выполнять операции подготовки порошка и предварительного закрепления алмазов. Качество соединения алмазоносного слоя с корпусом определяется правильностью и тщательностью выполнения операций подготовки корпуса под покрытие и правильным выбором состава ванн и силы тока для данного изделия в зависимости от его площади. Дендриты на алмазоносном слое могут образоваться из-за наличия примесей металла в алмазоносном порошке, загрязненности электролита, неправильного выбора режимов окончательного закрепления алмазов. Для предотвращения этого явления порошки алмазов тщательно подготовляют, а электролит периодически фильтруют.

Изготовление инструмента на керамической связке

На керамической связке изготовляют инструменты с простой формой алмазоносного слоя; чашечные и плоские круги типа АЧК, АПВ, АПВД; круги прямого профиля типа АПП; доводочные бруски и др. Ограниченность номенклатуры инструмента объясняется применением в качестве связующего керамических материалов. Из таких материалов трудно изготовить фасонные инструменты, поскольку шихта керамической связки плохо прессуется и при формовании трудно обеспечить равномерную плотность брикета. Так как керамические тела спекаются в свободном состоянии, неравномерность плотности приводит к неравномерной усадке и потере форм и размеров алмазоносного слоя. Производство алмазных инструментов на керамической связке имеет много общего с изготовлением такого же инструмента из электрокорунда, карбида кремния и др. Существенное отличие заключается в применении низкотемпературных связок, так как температура обжига алмазного инструмента на керамической связке ограничивается термостойкостью алмазов. Поэтому в качестве основного компонента связок используют низкотемпературные стекла, в том числе приготовленные сплавлением высокотемпературных материалов, придающих керамической связке прочность и износостойкость.

При изготовлении алмазных инструментов на керамической связке более высокие, по сравнению с обычными абразивными инструментами, требования предъявляются к точности формы алмазоносного слоя, так как обработка его чрезвычайно затруднена. Вследствие этого подбирают составы связок и режимы обжига, обеспечивающие

минимальную усадку. Технология изготовления алмазных инструментов из порошков керамических материалов отличается от процессов, описанных для органических и металлических связок, тем, что термическая обработка происходит в свободном состоянии. Наряду с преимуществами такому процессу присущи и недостатки. Например, при обжиге в свободном состоянии трудно обеспечить точные геометрические формы и размеры инструмента из-за неравномерной усадки. Кроме того, в случае быстрого нагрева или охлаждения могут образоваться трещины. Чтобы уменьшить вероятность появления брака, тщательно контролируют режимы обжига, применяют устройства для автоматического контроля температур, снижают скорость нагрева и охлаждения. Однако и эти мероприятия не всегда гарантируют качество инструмента.

Перспективным направлением изготовления инструмента является разработка таких керамических связок, которые можно обжигать в пресс-формах с последующим уплотнением. Температура обжига керамических связок алмазного инструмента не превышает 800° С, так что в качестве материалов пресс-форм в этом случае могут быть использованы те же жаропрочные сплавы, что и для металлических связок. В настоящее время в промышленности наиболее распространен процесс изготовления инструмента на керамической связке, включающий операции приготовления шихты алмазоносного слоя, формования брикета алмазного слоя, термической обработки в свободном состоянии, соединения алмазного слоя с корпусом и механической обработки инструмента, контроля качества и упаковки.

Состав связок и применяемые материалы. В качестве основного компонента связки используют специально приготовленное стекло (фритту) или другой материал, размягчающийся при температуре не выше температуры окисления алмазов. Для обеспечения высокой прочности, износостойкости и теплопроводности в состав связки вводят также шамот, карбид бора, алюминий и т. п. Стекло, используемое для приготовления связки, должно смачивать алмазы, так как в пористой керамической связке высокая прочность закрепления может быть достигнута только в результате сил адгезии. Например, в качестве одного из основных компонентов керамической связки может быть использовано легкоплавкое стекло, образующееся при сплавлении тетраборнокислого натрия, пегматита и углекислого лития. Смешивая порошок, полученный в результате дробления этого стекла, с определенным количеством порошков шамота, карбида бора и алюминия, получают шихту связки К1. При расчете массы связки для изготовления алмазоносного слоя инструмента учитывают пористость, которая составляет 25—40% от общего объема. Расчет выполняют по формуле

$$G_{св} = \gamma_{св} V \left(1 - 0{,}25 \frac{K}{100} - \frac{П}{100}\right) \cdot K_{п},$$

где $K_{п}$ — коэффициент, учитывающий потери шихты;
$П$ — пористость в %;

$\gamma_{св}$ — плотность связки в г/см³;
V — объем алмазоносного слоя в см³;
K — концентрация алмазов в %.
Плотность связки

$$\gamma_{св} = \frac{100}{\sum_{i=1}^{n} \frac{q_i}{\gamma_i}},$$

где q_i — содержание компонента в %;
γ_i — плотность компонента в г/см³.

Пример. Рассчитать количество шихты, потребной для изготовления круга АПП 200×10×5 из керамической связки К1 при 100%-ной концентрации алмазов.

По известному объему алмазоносного слоя и пористости, равной 25% для связки К1, определяем количество связки

$$G_{св} = 1{,}1\gamma_{св} \cdot 30{,}6 \left(1 - 0{,}25\frac{100}{100} - \frac{25}{100}\right).$$

Для случая, когда в связке содержится 38% фритты, 46% шамота, 7,5% карбида бора, 8,5% алюминия (плотность соответственно 2,5; 2,5; 2,5 и 2,7 г/см³), плотность

$$\gamma_{св} = \frac{100}{\sum_{i=1}^{n} \frac{q_i}{\gamma_i}} = \frac{100}{\frac{38}{2{,}5} + \frac{46}{2{,}5} + \frac{7{,}5}{2{,}5} + \frac{8{,}5}{2{,}7}} = \frac{100}{39{,}7} = 2{,}5 \text{ г/см}^3.$$

Подставив полученное значение $\gamma_{св}$, определим, что масса связки для изготовления круга

$$G_{св} = 1{,}1 \cdot 2{,}5 \cdot 30{,}6 \cdot 0{,}5 = 42{,}1 \text{ г}.$$

Для керамических связок припуск на механическую обработку не учитывается, так как незначительное изменение размеров в связи с необходимостью формования алмазоносного слоя с припуском компенсируется изменением пористости. Корпуса кругов формы типа АЧК и АПВ изготовляют из алюминия, формы АПП — из керамических материалов. При выборе материалов керамического корпуса необходимо, чтобы коэффициенты термического расширения корпуса и алмазного слоя были равны.

Для изготовления корпусов кругов АПП на связке К1 пригодна смесь порошка фритты с электрокорундом и цирконовым концентратом. Шихта такого состава прессуется и обжигается при тех же режимах, что и алмазоносный слой.

Для приготовления фритты и керамической связки используют природные материалы — пегматит и шамот. Из-за нестабильности их свойств трудно обеспечить высокое качество инструментов. Поэтому в последнее время разрабатываются составы связок на основе химически чистых окислов. Эти материалы дороже природных, однако получаемый эффект от повышения качества оправдывает дополнительные затраты.

Приготовление шихты алмазоносного слоя. Так же как и для органических и металлических связок, шихту керамической связки приготовляют из порошкообразных материалов. Легкоплавкую фритту получают, сплавляя исходные компоненты. Для этого вещества, входящие в состав шихты, дробят, смешивают и засыпают в огнеупорные тигли. Смесь нагревают на установках ТВЧ до полного расплавления компонентов, выдерживают при максимальной температуре в течение определенного времени, а затем резко охлаждают. Например, при варке легкоплавкой фритты Ф1 смесь компонентов, измельченных и просеянных через сито с размером ячеек 100 мкм, нагревают до температуры 1200° С, выдерживают при этой температуре 60—90 мин, а затем расплав выливают в воду. Фритта при этом растрескивается. После сушки частицы дробят на валковой дробилке или в шаровой мельнице и полученный порошок просеивают через сита с размерами ячеек 40—63 мкм. Качество приготовленной фритты проверяют по краевому углу смачивания, полученному при расплавлении пробы фритты при определенной температуре на листе асбеста. Для фритты Ф1, например, угол смачивания при температуре 750° С должен быть не больше 60°.

Все остальные компоненты, входящие в состав керамических связок, также приводят в порошкообразное состояние. Для приготовления качественной шихты связки необходимо, чтобы крупность частиц веществ, ее составляющих, была как можно меньше. При использовании мелкодисперсных материалов улучшается равномерность смешивания, активизируются процессы обжига. На практике пользуются порошком, проходящим через сита с размером ячеек 63—100 мкм. Навески компонентов шихты связки, приготовленные в соответствии с рецептурой, смешивают в барабанных смесителях в течение длительного времени (4—7 ч) до получения равномерного распределения всех компонентов. В барабан вместе с шихтой могут быть загружены фарфоровые шары диаметром 10—20 мм. Шары разбивают отдельные комки, что улучшает процесс смешивания. Приготовленная шихта керамической связки может храниться неограниченное время, так как ее компоненты не подвергаются окислению.

Шихту алмазоносного слоя на керамической связке приготовляют, смешивая навески шихты связки, алмазов и временного связующего. Использование временного связующего необходимо, так как шихта керамических связок, приготовленная из частиц хрупких материалов, не спрессовывается в прочный брикет даже при очень высоких давлениях. К временному связующему предъявляются особые требования. Оно должно прочно склеивать частицы брикета и выгорать без остатка при обжиге при температуре 450—500° С до образования стеклообразной массы. Если связующее вещество выгорает при более высокой температуре, выделяющиеся газы вспучивают брикет. В качестве временного связующего пригодно, например, связующее ПБ, которое выгорает при температуре 450° С до расплавления компонентов связки. Для получения прочных брикетов со связующим ПБ достаточно ввести его в количестве 3% от массы

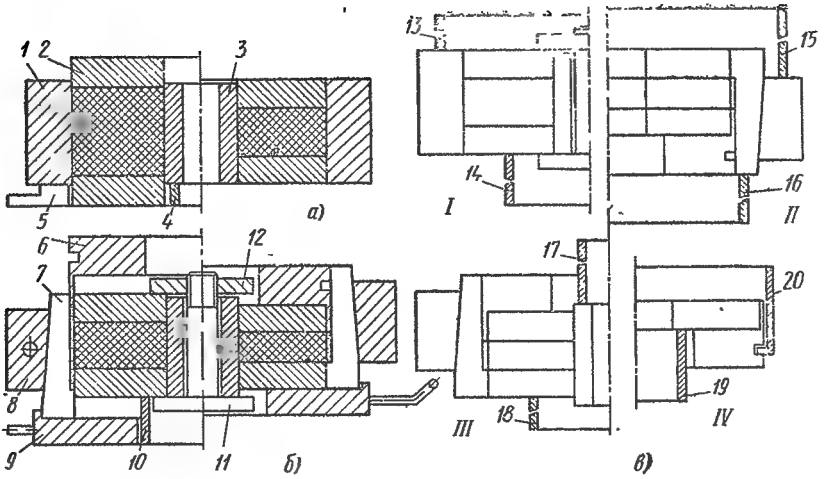


Рис. 91. Формование круга АПП на керамической связке:

а — брикетирование корпуса; *б* — брикетирование алмазоносного слоя; *в* — распрессовка; *1* — цилиндрическая обойма; *2* — пуансон для прессования корпуса; *3* — втулка; *4, 10* — опорные кольца; *5* — вкладыш; *6* — пуансон для прессования алмазоносного слоя; *7*—полукольцо; *8* — обойма; *9* — подставка; *11* — палец; *12*—гайка; *13—19* — кольца для распрессовки; *20* — полукольца для распрессовки

шихты связки. В качестве связующих пригодны и другие вещества, обеспечивающие требуемую прочность брикета.

Смешивание шихты связки с алмазами производят вручную или в барабанных смесителях. Предварительно алмазы увлажняют раствором глицерина в спирте. Порядок и техника выполнения операций не отличаются от описанных ранее. Время смешивания шихты алмазоносного слоя в барабанных смесителях 2—4 ч. Приготовленная со связующим ПБ шихта алмазоносного слоя хранится не более 2 дней.

Формование. При применении в качестве временного связующего фенолформальдегидных смол брикетирование инструмента на керамической связке производят так же, как и на органической, — горячим прессованием. Плоские кольца кругов типа АЧК, которые после обжига склеивают с алюминиевым корпусом, прессуют в пресс-формах, не отличающихся по конструкции от пресс-форм для изготовления кругов на органической связке. Круги прямого профиля типа АПП формуют в специальных пресс-формах в два этапа: первоначально брикетируют при давлении около 500 кгс/см^2 корпус (рис. 91, *а*), затем на него напрессовывают алмазоносный слой (рис. 91, *б*). В обоих случаях формование завершают горячим прессованием, которое выполняют на гидравлическом прессе, оборудованном подогревными плитами. Так как при формовании инструментов на керамической связке важно обеспечить заданную пористость, обычно используют схемы прессования «до упора». При использовании связующего ПБ температура прессования составляет 180° С, выдержка — 20 мин. Давление прессования выбирают

в зависимости от состава связки. Для разных связок давление составляет 500—1800 кгс/см². После горячего прессования производят распрессовку (*I*—*IV*; рис. 91, *в*). В результате формования получают прочные брикеты, подвергаемые затем обжигу.

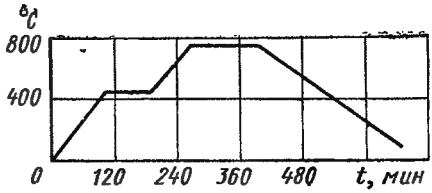


Рис. 92. График режима термической обработки алмазоносного слоя на керамической связке

При обжиге брикеты алмазоносного слоя изменяют свои размеры. Размеры инструмента компенсируются соответствующим увеличением или уменьшением размеров формующих полостей пресс-форм. Величина усадки определяется опытным путем. Для связки К1 коэффициент усадки составляет около 0,2%.

Обжиг. В процессе обжига отформованные брикеты алмазоносного слоя нагреваются до температуры размягчения стеклообразных составляющих. По мере нагрева происходит удаление влаги из брикета, а затем при повышении температуры — выгорание временного связующего. При этом через поры выделяется большое количество газов. При температуре выше 500° С расплавляются низкоплавкие компоненты связки, которые, взаимодействуя с другими, образуют стеклообразную массу. При максимальной температуре нагрева производят изотермическую выдержку для завершения процессов образования обожженного керамического тела. При медленном охлаждении материал связки затвердевает и прочно закрепляет частицы алмазов.

Для обжига изделия устанавливают на керамические прошлифованные плиты, которые загружают в электрическую камерную или щелевую печь. При этом необходимо обеспечить свободную циркуляцию нагретого воздуха. Режим обжига (рис. 92) оказывает решающее влияние на качество алмазоносного слоя. Для предотвращения образования трещин и коробления керамический брикет нагревают со скоростью не более 3—4° С/мин. По достижении температуры 450° С производят изотермическую выдержку в течение 3—4 ч. Во время этой выдержки выгорает временное связующее. После первой изотермической выдержки брикет нагревают с той же скоростью, что и ранее, до температуры 700—800° С. При этой температуре производят вторую изотермическую выдержку. Время выдержки — 0,5—2 ч в зависимости от размера изделия. Обожженные изделия затем охлаждают со скоростью до 4° С/мин. Обычно охлаждение производят вместе с печью, так как большая скорость может привести к образованию трещин.

Контроль качества инструмента после обжига включает операции проверки точности геометрических размеров и формы, наличия трещин, сколов и других дефектов алмазоносного слоя и определения твердости. Твердость контролируется на твердомере ТК-2 с использованием в качестве наконечника стального шарика диаметром 3,175 мм при нагрузке 60 кгс.

Для защиты алмазоносного слоя от вредного воздействия жидкостей в процессе эксплуатации, его пропитывают раствором связующего ПБ в ацетоне (200 г связующего ПБ на 1000 мл ацетона). Круги или кольца после обжига помещают в ванну с раствором, находящуюся в вакуумной установке. При откачке воздуха до давления не выше 0,6 кгс/см² из распределенных по всему объему алмазоносного слоя пор удаляется воздух. Затем под атмосферным давлением поры заполняются раствором. Изделия извлекают и сушат предварительно на воздухе до удаления ацетона, а затем в термошкафу при температуре 180° С в течение 3 ч. В процессе нагрева связующее ПБ отверждается. После пропитки инструменты передаются на операцию окончательной обработки. Круги, забракованные по какому-либо показателю, передаются на рекуперацию.

Окончательная обработка и контроль качеотва

Окончательная обработка алмазного абразивного инструмента включает соединение алмазоносного слоя с корпусом, сборку инструмента, обработку алмазоносного слоя и корпуса, контроль качества, отделку и упаковку. Соединение алмазоносного слоя с корпусом производят в случае раздельного их изготовления, например, при выпуске кругов АЧК, АПВ и им подобных на органической, металлической и керамической связках. Такая технология позволяет обеспечить точные размеры и форму алмазоносного слоя. Алмазоносный слой на органической и керамической связках приклеивают к алюминиевому или алюмобакелитовому корпусу. К клеящему веществу предъявляют высокие требования: клей должен быть прочным, влагостойким, нетоксичным, недефицитным и т. п. На практике широкое распространение получил двухкомпонентный клей ВК32-200, в состав которого входит каучук и фенолформальдегидные смолы. Этот клей после термической обработки дает прочное и эластичное соединение, прочность на сдвиг которого не менее 200 кгс/см².

Перед склеиванием смешивают компоненты, входящие в состав клея, согласно инструкции. Качественное и прочное соединение достигается при небольшой, но равномерной толщине пленки (0,1—0,2 мм). Для обеспечения наилучшего контакта по всей площади склеиваемые поверхности притирают на чугунной доводочной плите с использованием порошков абразивов, например, зеленого карбида кремния зернистостью 8—12. Так как качество клеевого соединения во многом зависит от чистоты склеиваемых поверхностей, то их тщательно протирают и промывают. На поверхности корпуса и алмазоносного слоя равномерно наносят тонкую пленку клея. После сушки первого слоя на воздухе в течение 30 мин наносят второй слой клея. Склеиваемые детали нагревают в сушильном шкафу до температуры 60° С и выдерживают в течение 90 мин. После охлаждения алмазоносный слой и корпус устанавливают в специальное приспособление, которое обеспечивает сжатие склеиваемых поверхностей с силой, создающей давление на поверхности контакта не менее 5—10 кгс/см². Приспособление устанавливают в электриче-

скую низкотемпературную печь и нагревают до 180 ± 5° С. При этой температуре производят изотермическую выдержку изделия в течение 120 мин и затем медленно охлаждают. Во время нагрева под давлением происходят процессы поликонденсации фенолформальдегидной смолы и вулканизации каучука, входящего в состав клея. В результате этих сложных процессов образуется высокопрочная, эластичная пленка, хорошо сцепленная с поверхностью, как слоя, так и корпуса. При склеивании инструментов на органической связке последняя операция термической обработки слоя клея может быть объединена с термической обработкой алмазоносного слоя, производимой для стабилизации его свойств.

Прочность клеевых соединений недостаточна для инструмента на металлической связке, так как при обработке такими кругами силы резания значительно больше, чем при применении органических и керамических связок. Поэтому для инструментов на металлической связке наиболее пригодно соединение диффузионным припеканием или пайкой. В тех случаях, когда корпус изготовлен из стали, присоединение алмазоносного слоя (припекание) выполняется одновременно с операциями спекания и уплотнения. При использовании алюминиевых корпусов из-за низкой температуры плавления алюминия такое соединение невозможно. В этом случае алмазоносный слой припекают к промежуточному (переходному) стальному кольцу, а соединение кольца с корпусом выполняется по прессовой посадке. Для этого точно обработанный алюминиевый корпус нагревают до температуры 180° С и устанавливают на стальное кольцо, на котором имеется проточка. После остывания вследствие различных коэффициентов термического расширения алюминиевый корпус прочно охватывает стальное кольцо. Для повышения надежности соединения корпус с кольцом обе детали в сборе засверливают и штифтуют.

При изготовлении инструмента на металлической связке одним из возможных методов соединения алмазоносного слоя с корпусом является пайка. Как правило, применяют твердые низкотемпературные припои, так как припои на основе олова недостаточно прочны, а высокотемпературные — непригодны из-за ограниченной термостойкости алмазов. Предъявляемым требованиям удовлетворяет стандартный припой марки ПСр40, температура плавления которого 605—630° С. Для улучшения процесса пайки на поверхность соединяемых деталей наносят флюс, способствующий лучшему растеканию припоя по поверхности. В качестве флюса для серебряных припоев может быть рекомендован порошкообразный материал, состоящий из борного ангидрида (25 вес. ч.), фтористого калия (35 вес. ч.) и фторбората калия (40 вес. ч.). Эти компоненты предварительно сушат, затем дробят в шаровой мельнице со стальными шарами и смешивают в течение длительного времени. При пайке флюс наносят на поверхность корпуса, тщательно очищенную от загрязнения. Затем корпус нагревают газовой горелкой или на установке ТВЧ и покрывают тонким слоем припоя. Для пайки, например, сегментов отрезных сегментных кругов к корпусу используют специальные при-

способления, обеспечивающие нагрев места пайки с одновременной точной установкой сегмента относительно корпуса. После пайки алмазоносного слоя к корпусу зачищают наплывы припоя и проверяют соединение на ультразвуковом дефектоскопе.

При изготовлении крупногабаритных сборных инструментов, например, кругов для бесцентрового шлифования, плоских секторных планшайб, диаметр которых больше 400 мм, перед механической обработкой слоя производят сборку. Как правило, используют резьбовые соединения. Болты должны быть тщательно затянуты и застопорены для предотвращения отвинчивания во время эксплуатации.

Механическая обработка корпуса и алмазоносного слоя инструмента производится для удаления технологических припусков, обеспечения точного расположения алмазоносного слоя относительно установочных баз, заданной величины торцового и радиального биения в соответствии с техническими условиями и вскрытия (обнажения) алмазных зерен на рабочей поверхности инструмента.

При изготовлении инструмента на металлической связке вначале, базируясь на алмазоносный слой, производят механическую обработку корпуса для удаления припусков. Затем, выбрав в качестве базы одну из обработанных поверхностей, чаще всего установочную, шлифуют алмазоносный слой. Такая последовательность существенно уменьшает трудоемкость операции шлифования слоя. При выпуске кругов на органической и керамической связках, корпуса которых изготовлены без припусков, обрабатывают только алмазоносный слой.

Основным методом обработки алмазоносного слоя на всех связках является шлифование. Кроме того, при изготовлении инструмента на металлической связке возможна электроискровая обработка и пластическое деформирование алмазоносного слоя Абразивную обработку алмазоносного слоя выполняют на шлифовальных станках. Обрабатываемый круг можно устанавливать на оправке специального приспособления (рис. 93, *а*, *б*, *в*) и шлифовать абразивными кругами на керамической связке из зеленого карбида кремния или электрокорунда зернистостью 16—40. Для крупнозернистых алмазных кругов применяют абразивные круги твердостью СМ1, СМ2 из зеленого карбида кремния, для мелкозернистых — из электрокорунда. Шлифование производят без охлаждения с ручной подачей при скорости вращения обрабатываемого инструмента 5—10 м/мин и абразивного круга 20—30 м/с. Плоские поверхности алмазного инструмента диаметром более 300 мм можно прошлифовать на станках типа 3Б740 с вращающимся столом. При этом, первоначально базируясь на алмазоносный слой, шлифуют опорную поверхность, а затем — алмазоносный слой. Такая последовательность операций при высокой точности обеспечивает минимальный объем шлифования труднообрабатываемого материала алмазоносного слоя.

Шлифовать алмазоносный слой можно только у инструмента простой формы. Алмазоносный слой инструмента сложной формы нельзя шлифовать из-за низкой стойкости абразивных кругов. В этом

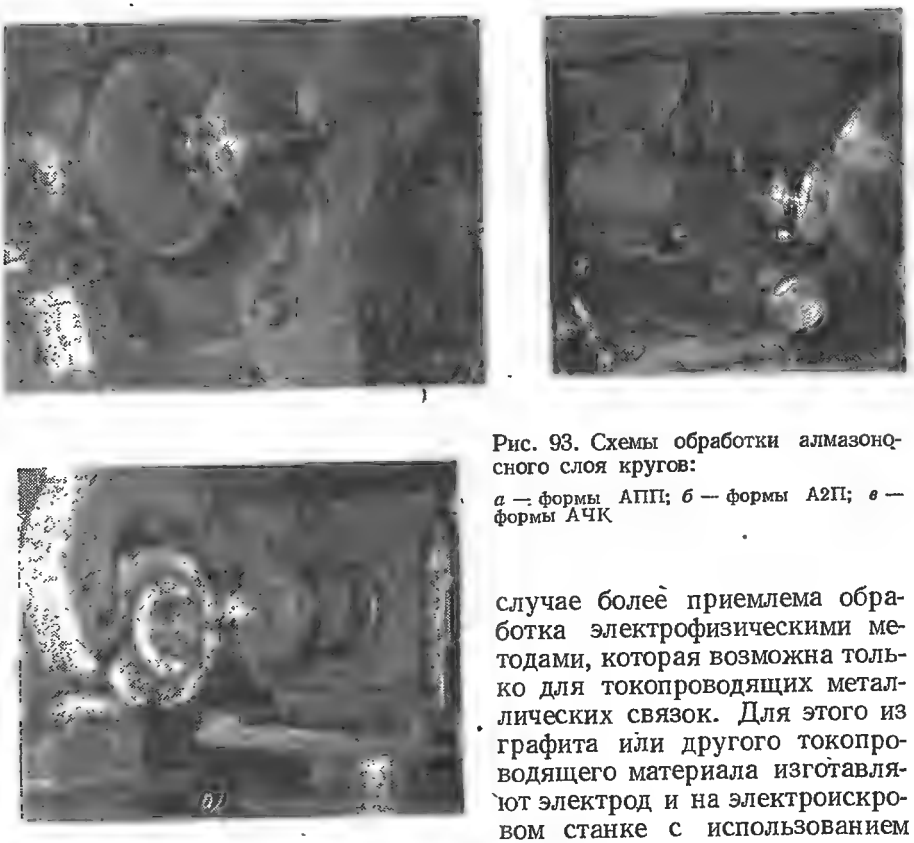


Рис. 93. Схемы обработки алмазоносного слоя кругов:

а — формы АПП; *б* — формы А2П; *в* — формы АЧК

случае более приемлема обработка электрофизическими методами, которая возможна только для токопроводящих металлических связок. Для этого из графита или другого токопроводящего материала изготавливают электрод и на электроискровом станке с использованием специального приспособления производят правку. Метод электроискровой обработки обеспечивает высокую производительность обработки. Однако точность правки недостаточна.

Пластическое деформирование алмазоносного слоя используют для придания высокой точности профиля сложнофасонным инструментам. В некоторых случаях, например при изготовлении многониточных кругов, этот метод обработки является единственно возможным. Для пластического деформирования пригодны специальные металлические связки, например однокомпонентные на основе меди или алюминия. Пластическая деформация спеченного алмазоносного слоя требует больших усилий. Ролики, которыми производят деформирование, изготовляют из твердого сплава. Их устанавливают на оправке в специальном приспособлении (рис. 94) и при вращении с прижимом на алмазоносном слое накатывают требуемый профиль. В сочетании с электроискровой предварительной обработкой алмазоносного слоя метод пластического деформирования может быть применен и при значительной глубине профиля слоя.

В процессе окончательной обработки проверяют биение алмазоносного слоя относительно посадочного отверстия и некоторые другие параметры. Контроль качества инструмента включает проверку

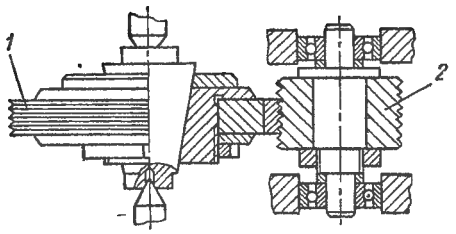


Рис. 94. Схема профилирования алмазных многониточных кругов пластическим деформированием:

1 — алмазный круг; *2* — ролик

прочности инструмента, точности форм и размеров, показателей работоспособности. В процессе изготовления обязательно производят пооперационный контроль качества готовой продукции. Последовательность операции контроля качества определяют при разработке технологии. Например, прочность кругов, как правило, проверяют до шлифования алмазоносного слоя. Однако при использовании метода пластического деформирования следует обязательно проверить прочность слоя и после накатки, так как в процессе ее могут появляться трещины, отслаивания и другие дефекты.

Важнейшей операцией контроля является проверка прочности соединения алмазоносного слоя с корпусом. Рабочая скорость алмазных кругов достигает 40 м/с, и непрочное крепление слоя к корпусу может быть причиной несчастных случаев. Поэтому алмазные круги согласно ГОСТ 16181—70 проверяют на прочность и у изготовителя, и у потребителя. Основным методом испытания прочности кругов является вращение со скоростью на 50% выше рабочей. Считается, что если в этих условиях круг не разрушается в течение 5 мин, то он пригоден для безопасной работы. Для испытаний используют те же стенды, что и для абразивных кругов. Круг помещают в закрытую камеру и вращают при заданной скорости в течение 5 мин. Данные об испытании заносят в прошнурованную книгу.

Работоспособность алмазных инструментов проверяют при обработке с заданными режимами образцов материала в условиях, приближающихся к эксплуатационным. При этом измеряют расход алмаза по отношению к массе или объему сошлифованного материала, мощность резания и расход электроэнергии. Методы испытаний, материал образцов, режимы обработки и другие условия задаются, как правило, в технических условиях и стандартах. Например, для испытания кругов, используемых для заточки, применяют автоматизированные станки, управление которыми производится с централизованного пульта. Испытуемый круг шлифует пластинки твердого сплава. Износ круга в процессе шлифования измеряют линейным методом с использованием, например, оптического длиномера ИЗВ-200, а образцов — весовым методом. После соответствующих расчетов определяют удельный расход алмазов и результаты испытаний фиксируют в протоколе. Показатели качества сравнивают с нормами, предусмотренными в технических условиях и ГОСТах.

Инструменты, качество которых соответствует установленным требованиям, передаются на отделочную обработку, основной целью которой является придание изделию окончательных размеров и товарного вида, соответствующего утвержденному образцу. Припуск, оставляемый для отделочной обработки, обычно не превышает не-

скольких долей миллиметра. В некоторых случаях для очистки поверхности инструмента от загрязнений, следов теплозащитной смазки производят дробеструйную обработку или галтовку в барабанах с абразивной эмульсией. Такая обработка предусмотрена, например, при серийном изготовлении алмазных хонинговальных брусков на металлической связке. После отделочной обработки маркируют обозначение, выполняют балансировку, антикоррозионную обработку. Как правило, характеристику инструмента наносят методом гравирования. Однако могут быть использованы и другие процессы, например, клеймение, фотохимическое травление, наклейка этикеток и др. При гравировании необходимо следить за тем, чтобы на корпусе инструмента не появлялись царапины, вмятины и другие дефекты поверхности, портящие внешний вид изделий.

Балансировка шлифовальных кругов производится с использованием балансировочных станков типа ДБ10. В установленных местах после определения дисбаланса высверливают металл, добиваясь, чтобы величина дисбаланса не превышала заданной в технических условиях ГОСТ 16181—70. Антикоррозионная обработка инструмента производится для защиты его поверхности от окисления в процессе хранения и работы. Для защиты корпус покрывают тонким слоем смазки. После антикоррозионной обработки выписывают сопровождающий документ и упаковывают инструмент. Небольшие по размеру инструменты, надфили, сверла, хонинговальные бруски и шлифовальные головки упаковывают в чехлы из полихлорвиниловой пленки. Края сваривают на установках ТВЧ.

Шлифовальные круги, отрезные инструменты, планшайбы, размер которых не превышает 300 мм, упаковывают в коробки из пластмасс. В качестве материала может быть использован карболит, который прессуют в стационарных пресс-формах, устанавливаемых на гидравлических прессах. В последнее время распространено изготовление упаковки из пенополистирола. Гранулы этого материала засыпают в герметичную алюминиевую форму. При нагреве гранулы прочно соединяются, значительно увеличивают свой объем и заполняют форму, прочно соединяясь между собой. Крупногабаритные инструменты, например, круги для бесцентрового шлифования и сегментные отрезные круги, упаковывают в деревянные ящики, обшитые металлической лентой.

Рекуперация алмазов

Основным принципом рекуперации является растворение связки в кислотах или щелочах, не действующих на алмазы. Если температура выгорания связующего не более 600° С, связку сжигают, очищая затем алмазы от остатков. Во всех случаях для уменьшения трудоемкости рекуперации и снижения расхода кислот и других химикатов алмазоносный слой отделяют от корпуса. Рекуперация — сложный химический процесс, который нужно выполнять весьма тщательно с соблюдением особых мер предосторожности. Последовательность операций и применяемые химикаты выбирают в зави-

симости от состава связки. Полученные после рекуперации алмазы могут быть использованы для изготовления инструмента.

Рекуперация алмазов из органической связки. Органические вещества плохо растворяются в кислотах и щелочах. Поэтому при рекуперации их, как правило, выжигают. Например, при изготовлении инструментов с использованием связующего ПБ для извлечения алмазов алмазоносный слой, отделенный от корпуса, нагревают до температуры 400—500° С, при которой связующее полностью разлагается и выгорает. После сжигания остается смесь алмазов и наполнителя, в которой содержится небольшое количество коксовидных остатков от сожженного связующего. В тех случаях, когда в качестве наполнителя используются вещества, не окисляющиеся во время сжигания, после удаления коксовидных остатков смесь может быть использована для изготовления инструмента на той же связке и с такой же концентрацией алмазов, что и до рекуперации. Такой процесс возможен для связок Б1, Б3 и Б4, в состав которых входит карбид бора, электрокорунд и зеленый карбид кремния. Образовавшиеся при сгорании связующего коксовидные остатки удаляют, обрабатывая смесь алмазов и наполнителя в нагретом растворе соляной кислоты (1 : 1) с последующим травлением хромовой смесью того же состава, что и для обработки алмазных порошков перед гальваническим покрытием. Смесь алмазов и наполнителя, полученную после обработки кислотой продуктов, выделенных в результате сжигания связующего, заливают приготовленным хромовым раствором и нагревают в течение 10—15 мин. При этом не допускают полного удаления воды, так как может выпасть желто-зеленый осадок основной соли хрома, нерастворимый ни в кислотах, ни в щелочах. Чтобы удалить желтоватый налет с поверхности алмазов, их кипятят в течение 5—10 мин в 10%-ном растворе щелочи, которую затем нейтрализуют кислотой. Полученные в результате рекуперации порошки (смесь алмазов с наполнителем) промывают дистиллированной водой, спиртом и окончательно сушат.

Потери шлифпорошков алмазов при совместной рекуперации с наполнителем составляют в среднем 5—10% в зависимости от зернистости алмазов. Для смесей, содержащих микропорошки, потери больше, чем для шлифпорошков. Если в состав связки в качестве наполнителя входит металл, то при сжигании связующего он окисляется и получаемую смесь нельзя использовать для изготовления инструмента. Для удаления металла и окислов и выделения алмазов из смеси Б2, содержащей в качестве наполнителя железо, полученный после сжигания связки материал помещают в нагретую соляную кислоту. После прекращения выделения газов раствор разбавляют водой, отстаивают до полного оседания частиц, сливают и тщательно промывают осадок. Затем материал обрабатывают хромовой смесью, как описано выше, и получают очищенные алмазы.

При необходимости извлечения алмазов из связок, содержащих карбид бора и зеленый карбид кремния, смесь алмазов с наполнителем сплавляют со щелочью в присутствии окислителя, например азотистокислого натрия. Для этого в смесь порошка алмазов и на-

полнителя добавляют 8—10-кратное количество щелочи и нагревают в никелевой лодочке при температуре 500° С до прекращения выделения паров воды. Затем добавляют окислитель и снова нагревают. После охлаждения раствор промывают водой, затем для нейтрализации кислотой и снова водой. Тонкий налет кремниевой кислоты на алмазах отмывают кипячением в концентрированном растворе щелочи или обработкой смеси в платиновой посуде плавиковой кислотой в присутствии серной. При рекуперации алмазов из связок, содержащих электрокорунд, смесь алмазов и наполнителя сплавляют с пиросернокислым калием или с кислым сернокислым калием. Потери алмазов при полной рекуперации из связок больше, чем при совместной с наполнителем, и составляют до 20%.

Рекуперация алмазов из металлической связки. Чтобы извлечь алмазы из алмазоносного слоя на металлической связке его отделяют от корпуса и растворяют в кислотах; затем алмазы очищают от примесей и промывают. Алмазоносный слой от корпуса отделяют, как правило, путем механической обработки. При этом следует стремиться к тому, чтобы на алмазоносном слое оставалось минимальное количество материала корпуса. Связки растворяют в сильнодействующих растворах типа «царской водки», в концентрированной серной кислоте или щелочи. Для связок на бронзовой или железной основе используют «царскую водку» — смесь одного объема азотной и трех объемов соляной кислоты. Алмазоносный слой обрабатывают в стакане из термостойкого стекла при умеренном нагревании до окончания выделения газов. Затем смесь разбавляют дистиллированной водой и промывают в щелочах и воде до полной нейтрализации. Если в порошке при просмотре под микроскопом обнаруживают частицы графита, то их удаляют обработкой хромовой смесью.

Для растворения алюминиевого сплава предварительно производят обработку связки 10%-ным раствором едкой щелочи. После полного прекращения реакции остаток отмывают водой и полученную смесь обрабатывают «царской водкой». Когда в состав шихты алмазоносного слоя входят твердосплавные смеси, то для их растворения используют смесь концентрированных плавиковой и азотной кислот в соотношении 3 : 1. Обработку выполняют в платиновой чашке, во избежание разрушения стеклянной посуды под действием плавиковой кислоты. Разделение алмазов и абразивных порошков электрокорунда и карбида кремния, которые иногда используются в качестве компонентов связки, выполняют после растворения металлической составляющей связки сплавлением, так же как и при рекуперации алмазных порошков из органических связок. Отделенный от примесей и тщательно промытый порошок алмаза сушат в сушильном шкафу при температуре 100—110° С, после чего передают на переклассификацию для дальнейшего использования. Потери алмазов при рекуперации составляют 10—20%.

Рекуперация алмазов из керамической связки. Керамическая связка не разрушается кислотами и не сгорает. Для извлечения из нее алмазов производят сплавление материала, полученного в результате дробления алмазоносного слоя, с 6—8-кратным по объему

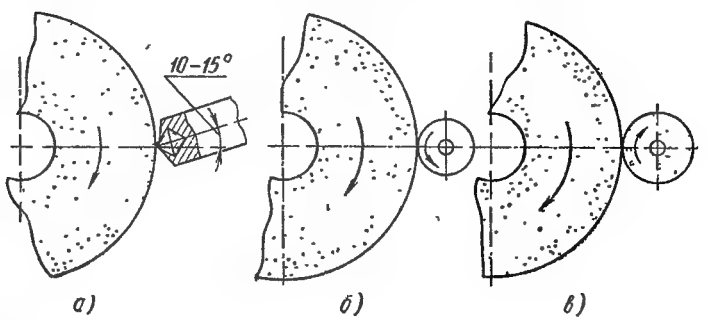
количеством едкой щелочи. Смесь нагревают в тигле до температуры 400—500° С. После охлаждения сплав отделяют от стенок тигля, нагревая его в горячей воде. Силикат, полученный в результате сплавления, обрабатывают последовательно 10%-ным раствором щелочи и 10%-ным раствором соляной кислоты. При необходимости операцию сплавления повторяют до полного отделения алмазов. Для окончательного удаления кремниевой кислоты, остающейся в виде налета на частицах алмаза, порошок заливают в платиновой посуде плавиковой кислотой с добавлением нескольких капель серной. Полученный раствор выпаривают, а алмазы промывают последовательно дистиллированной водой и спиртом, затем сушат в сушильном шкафу. В случае необходимости может быть произведена дополнительная очистка алмазов хромовой смесью, как описано выше. Потери алмазов при рекуперации из керамических связок составляют 15—20%.

§ 3. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ИНСТРУМЕНТА ИЗ КРИСТАЛЛОВ АЛМАЗА

Классификация инструмента

Правящий инструмент. При шлифовании инструментом из обычных абразивных материалов восстановление формы и режущих свойств рабочей поверхности обеспечивают правкой. Правку шлифовальных кругов осуществляют различными методами (рис. 95), основными из которых являются: обтачивание алмазными инструментами (рис. 95, *а*); обкатывание безалмазным или алмазным правящим инструментом (рис. 95, *б*); шлифование алмазными кругами и абразивными кругами из карбида кремния. Для правки методом обтачивания применяют алмазно-металлические карандаши, алмазные зерна с естественными гранями, закрепленные в оправках, алмазные профильные резцы, алмазные иглы, алмазные правящие бруски, а для правки методом обкатывания и шлифования применяют алмазные правящие ролики.

Рис. 95. Методы правки абразивных кругов:
а — обтачиванием; *б* — обкатыванием; *в* — шлифованием



Алмазно-металлические карандаши имеют цилиндрическую форму и состоят из алмазоносной вставки и оправки. Алмазоносная вставка, содержащая один или несколько кристаллов алмаза, расположенных в определенном порядке, закреплена в передней части оправки. Хвостовая часть оправки предназначена для крепления на станке. Форма, размеры и показатели качества алмазно-металлических карандашей регламентированы ГОСТ 607—63. В зависимости от схемы расположения алмазных зерен алмазно-металлические карандаши делятся на несколько типов: Ц — зерна расположены цепочкой вдоль оси карандаша: С — зерна расположены слоями (исполнение I — без перекрытия, исполнение II — с перекрытием), Н — зерна расположены неориентированно. В пределах каждого типа карандаши делятся по массе отдельных кристаллов или по номеру зернистости. В табл. 41 представлены основные типы, размеры и характеристики алмазных металлических карандашей согласно ГОСТ 607—63.

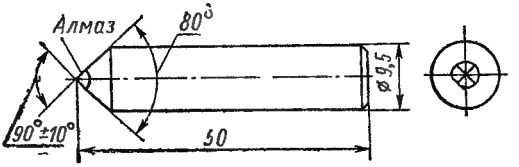


Рис. 96. Алмазная игла АИ-2

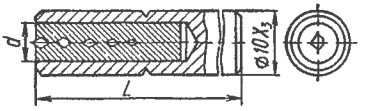
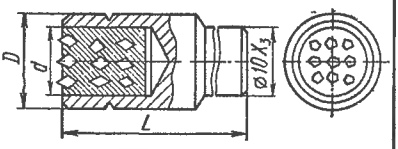
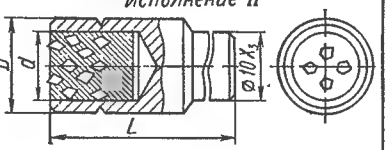
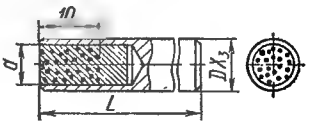
Алмазы в оправах применяются в основном для правки шлифовальных кругов фасонного профиля, а также в тех случаях, когда при правке шлифовальных кругов прямолинейного профиля алмазно-металлические карандаши не обеспечивают достаточной точности формы микрогеометрии обрабатываемой поверхности. Для их изготовления применяются кристаллы алмаза массой 0,05—1,75 карата и более, имеющие естественные острые ребра. Форма оправы до настоящего времени не регламентирована нормалями. Срок службы алмаза в оправе определяется правильной ориентацией кристалла по вектору твердости, прочностью крепления в оправе и своевременной переустановкой алмазного зерна в процессе эксплуатации. Установлено, что критерием предельного износа является площадка затупления, составляющая 25—30% от наибольшей площади поперечного сечения зерна.

Алмазные иглы (рис. 96) — инструмент, рабочей частью которого является закрепленный по оси оправы со стороны торца кристалл алмаза, имеющий острую вершину, ограненную в форме четырехгранной пирамиды с углом между противоположными гранями при вершине 90 ± 10°. Вершина пирамиды не имеет перемычки. Оправа имеет форму стержня и изготовляется из калиброванной прутковой стали 20. Алмазные иглы применяют в основном для правки резьбошлифовальных кругов. Для их изготовления используют алмазные зерна массой 0,08—0,3 карата.

Алмазные ролики — инструмент в форме тела вращения, предназначен для профилирования и правки шлифовальных абразивных кругов, на внешней поверхности которого расположен алмазоносный слой. Для правки абразивных кругов сложного профиля применяют блок роликов, состоящий из нескольких роликов

Таблица 4

Характеристика алмазно-металлических карандашей

Тип	Схема	Марка	Масса кристаллов в каратах или размер зерна по ГОСТ 9206—70	Количество алмазов в слое	Размеры и форма оправы в мм		
					D	d	L
Ц		1	0,03—0,05	1	10	6	55
		2 *	0,05—0,10				
		3	0,05—0,10				
		4	0,10—0,20			8	45
		5	0,20—0,50				
		6	0,31—0,50				
С	*Исполнение I*  *Исполнение II* 	1	0,017—0,025	12—14	18	14	45
		2	0,05—0,10	4—5			
		3	0,1—0,2	2—4	14	10	
		4					
		5	0,11—0,2	5—7	18	14	
Н		1	63/50	Не регламентировано	8	6	45
		2	100/80				
		3	125/100				
		4	200/160				
		5	315/250				
		6	400/315				
		7	0,0025—0,008		10	8	

* Карандаши марки Ц2 изготовляют из удлиненных кристаллов алмаза.

различного диаметра и профиля, соединяемых между собой. Ролики прямого профиля имеют наружный диаметр 70 и 69,85 мм, ширину 10 и 20 мм; изготовляют из природных алмазов; технические требования к ним оговорены ГОСТ 16014—70. Гарантийный срок службы этих роликов должен быть не меньше 20 тыс. правок абразивного круга 1100×63×305 23А 40П 62К по ГОСТ 2424—67 при следующем режиме: частота вращения ролика 2800 об/мин; продольная подача 0,3 м/мин; поперечная подача 0,02 мм/дв. ход; скорость вращения абразивного круга 35 м/с. В последнее время созданы ролики из синтетических алмазов, не уступающие по качеству роликам из природных алмазов.

Буровой инструмент. В геологоразведочном бурении применяют алмазные инструменты следующих типов: однослойные, многослойные и импрегнированные коронки, бескерновые наконечники и расширители. Для эксплуатационного бурения в основном применяют бескерновые наконечники и буровые долота.

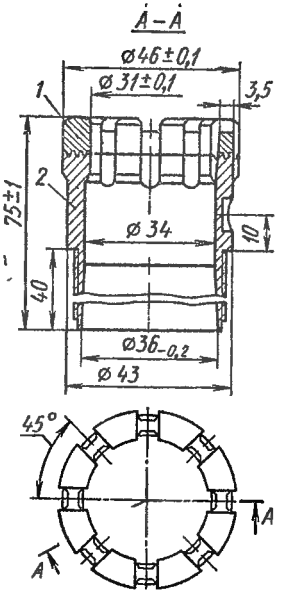


Рис. 97. Алмазная коронка КАИ

Коронки (рис. 97) состоят из корпуса *2*, к которому припаяна алмазосодержащая матрица *1*, алмазы в которой могут располагаться в один слой на ее режущей поверхности, несколькими слоями в определенном порядке, обеспечивающем по мере износа алмазов первого слоя выход на рабочую поверхность зерен следующего слоя, импрегнированно, т. е. произвольно с равномерным распределением по всему объему матрицы. Внутреннюю и наружную поверхности коронки армируют алмазами, которые называют подрезными. Эффективность алмазной коронки зависит от целого ряда факторов, таких как износостойкость алмазосодержащей матрицы, сорт алмазов и их качество, крупность алмазов и величина их выступания из тела матрицы, схема раскладки алмазов, конструкция корпуса, геометрия режущей части, промывочной системы.

Матрица должна иметь определенную износостойкость, применительно к различным физико-механическим свойствам породы, а также обеспечивать прочное закрепление алмазов наряду с постоянным обнажением на величину, при которой происходит наиболее эффективное разрушение породы. Чем тверже порода и выше ее абразивные свойства, тем тверже должна быть матрица, с большей износостойкостью и наоборот. Износ матрицы должен соответствовать износу алмазных зерен с тем, чтобы в процессе бурения обеспечить постоянный зазор между матрицей и забоем, достаточный для внедрения алмазов в породу и выноса шлама. По износостойкости матрицы разделяют на три типа: стандартные (*HRC* 20—25) для бурения в монолитных породах, а также в трещиноватых породах малой и средней абразивности; твердые (*HRC* 30—40) для бурения в абразивных породах; сверхтвердые (*HRC* 45—55) для бурения в весьма абразивных горных породах, представляющих собой сцементированные зерна твердых минералов.

При изготовлении коронок необходимо использовать однородные по качеству алмазы. При этом наружные и внутренние кромки торца, боковые поверхности коронок, передние части секторов алмазосодержащего кольца армируют алмазами большего размера и лучшего качества. Оснащение коронок алмазами различной зернистости необходимо производить в строгом соответствии с назначением ко-

ронки. Установлено, что величина алмазов должна соответствовать зернистости породы и особенностям ее разрушения алмазами. Чем больше выступающая часть алмаза по размерам соответствует частице, которую предстоит отделить от породы, тем производительнее будет работать коронка. Для мягких и крупнозернистых пород требуются крупные алмазы. В породах мелкозернистых (зернистость визуально трудно различима) мелкие алмазы бурят быстрее. В породах средней крепости для однослойных коронок применяют алмазы зернистостью 20—40 шт. на карат, а для бурения твердых и очень твердых пород — алмазы зернистостью 40—200 шт. на карат. Размещение алмазов должно обеспечивать полное перекрытие поверхности забоя. Рациональная схема расположения алмазов, разработанная в институте сверхтвердых материалов, основывается на следующих исходных данных:

а) алмазные зерна располагаются по концентрическим окружностям — линиям резания и по радиусам с обязательным перекрытием между соседними линиями резания;

б) с учетом относительно небольшой ширины рабочего торца алмазной коронки количество зерен в каждой линии резания принято одинаковым, независимо от расположения ее на торце матрицы.

Импрегнированные коронки применяются для бурения самых твердых монолитных и трещиноватых пород (железистые кварциты, джеспилиты, яшмы, сплошной кварц, роговики и др.). Также успешно они работают в слабосвязанных конгломератах, валунно-галечных наслоениях и некоторых породах средней крепости. Наилучшие результаты импрегнированные коронки дают в однородных породах, имеющих определенную степень абразивности и кристаллическую структуру. Импрегнированные коронки для геологоразведочного бурения изготовляют из алмазов сорта борт зернистостью 120—450 шт. на карат. В качестве подрезных алмазов используются более крупные кристаллы — борт третьей категории XV группы зернистостью 30—60 шт. на карат и овализованные алмазы XXII группы той же зернистости. Расширяется применение импрегнированных коронок, оснащенных синтетическими алмазами. Высококачественные синтетические алмазы марок АСС позволяют обеспечить потребность нашей страны в алмазном буровом инструменте, независимо от размеров добычи природных алмазов.

Импрегнированные коронки изготовляют из мелких алмазных зерен, равномерно распределенных по всему рабочему торцу матрицы. Установлено, что для импрегнированных коронок наиболее рациональной является 100—120%-ная концентрация алмазов, размер зерен которых составляет 0,4—0,2 мм (зернистость 250/200—125/100). Коронка должна иметь развитую промывочную систему — 8—12 канавок шириной по 5 мм по рабочему торцу. По форме торца мелкоалмазные коронки выпускают с четырьмя стандартными профилями: круглым (рис. 98, *а*), полузакругленным (рис. 98, *б*), плоским (рис. 98, *в*), куполообразным (рис. 98, *г*). Коронки с круглым торцом, радиус закругления которого равен половине толщины алмазосодержащей матрицы, применяются в геологоразведочном

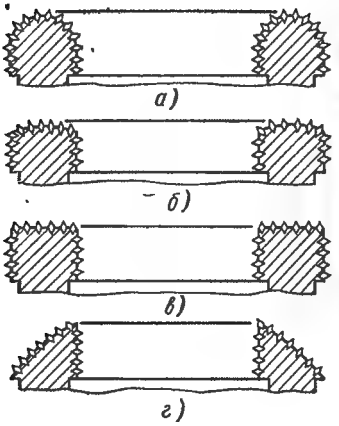


Рис. 98. Формы торца матрицы буровых коронок:

а — круглая; *б* — полузакругленная; *в* — плоская; *г* — куполообразная

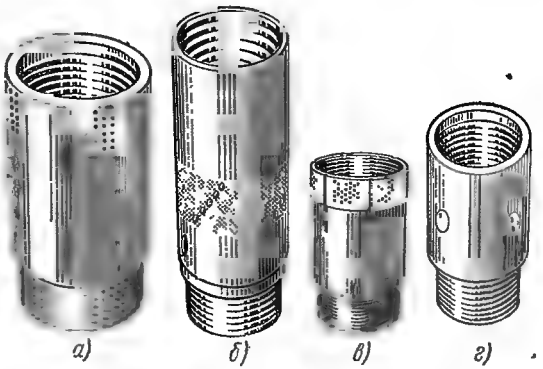


Рис. 99. Калибрующие расширители

бурении. Полузакругленный торец имеет радиус закругления, равный толщине алмазоносной матрицы. Коронки в основном выпускают с таким профилем торца. Плоский торец имеют в основном коронки с импрегнированным расположением алмазов. Выступ внутреннего края коронок с куполообразным профилем направляет коронку и обеспечивает прямолинейность скважины. Корпус коронки служит для соединения алмазоносной матрицы с колонковой трубкой с помощью резьбы. Алмазные коронки выпускают как с наружной, так и с внутренней резьбой. Для более прочного соединения с алмазосодержащим слоем на поверхности сопряжения с ним корпус имеет, как правило, кольцевые канавки и радиальные пазы. Корпуса коронок изготовляют из низкоуглеродистых сталей, например стали 20.

Р а с ш и р и т е л и. В процессе бурения коронки изнашиваются как по торцу, так и по наружной поверхности, что приводит к уменьшению диаметра скважины. При замене изношенной коронки новой последняя сразу не доходит до забоя, и нужно затрачивать определенное время на разбуривание скважины. Поэтому очень важно поддерживать постоянный диаметр скважины. Это обеспечивается применением специального алмазного инструмента, который получил название расширителя. Расширитель, однако, не только калибрует диаметр скважины, но и выполняет функции стабилизатора, уменьшая вибрации и искривление оси скважины. Расширители разделяют на калибрующие (рис. 99), сохраняющие диаметр скважины, и конические (рис. 100), увеличивающие диаметр. Расширители состоят из корпуса с резьбой на обоих концах (под коронку с одной стороны и под колонковую трубу — с другой) и алмазо-

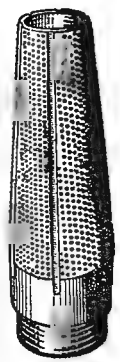


Рис. 100. Конический расширитель

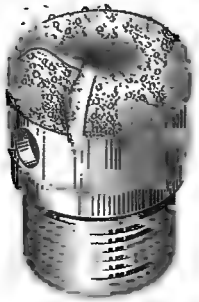


Рис. 101. Бескерновый наконечник

носной матрицы, расположенной по его боковой поверхности. По конструктивным особенностям калибрующие расширители можно разделить на три группы: полосчатые, кольцевые и пятачковые. Для бурения в породах средней и высокой твердости применяют расширители полосчатого типа. Алмазоносная матрица этих расширителей выполнена в виде брусков, расположенных по образующей (рис. 99, *а*) или по винтовой линии (рис. 99, *б*). Кольцевые расширители (рис. 99, *в*) оснащены расположенными по образующей (параллельно оси вращения) ребрами, армированными алмазами. Такие расширители трудоемки в изготовлении и применяются редко — в основном при бурении в тяжелых условиях. Наиболее дешевые в изготовлении — расширители «пятачкового» типа (рис. 99, *г*). Они применяются при бурении в мягких породах и средней твердости. Конические расширители (рис. 100) применяют при искусственном искривлении скважины и для разбуривания скважин на следующий размер в твердых и разрушенных породах.

Бескерновые наконечники (рис. 101) применяют в основном при эксплуатационном бурении для получения взрывных скважин — шпуров. В геологоразведочном бурении их применяют только в тех случаях, когда геологическое строение пород на определенную глубину хорошо изучено и назначение скважины допускает проходку без отбора пробы. Аналогично коронкам, бескерновые наконечники состоят из корпуса и алмазосодержащей матрицы. Алмазы по торцу располагаются таким образом, чтобы было полное, многократное перекрытие каждой концентрической окружности. В связи с тем, что линейная скорость вращения, по мере приближения к оси, уменьшается, алмазы, для обеспечения равномерного износа, в центральной части располагают гуще.

Алмазный режущий инструмент. В последнее время широкое распространение получает алмазное точение, которое производится при повышенных скоростях, малых подачах и глубинах резания на станках с повышенной жесткостью и обеспечивает получение шероховатости обработанной поверхности в пределах 8—14-го класса при 1-м классе точности. Алмазное точение производится различными конструкциями алмазных резцов. Малые силы резания алмазными резцами позволяют успешно использовать их при точении деталей с толщиной стенок до 0,2 мм, а высокая размерная стойкость обеспечивает стабильную работу станков-автоматов или автоматических линий.

Конструкция алмазных резцов (рис. 102) зависит от ряда факторов: метода обработки и вида выполняемой операции; физико-механических свойств обрабатываемого материала; конструкции станка и крепежного приспособления; размера алмазного зерна; метода крепления алмаза в державке. Физико-механические свойства материала обрабатываемой детали оказывают существенное влияние

Таблица 42

Параметры алмазных резцов

Материал обрабатываемой детали	Угол в град	
	передний	задний
Латунь, медь, пластмассы, антифрикционные сплавы, алюминий	0÷—3	8—12
Бронза, титан, твердые и алюминиевые сплавы	—3÷—8	6—8

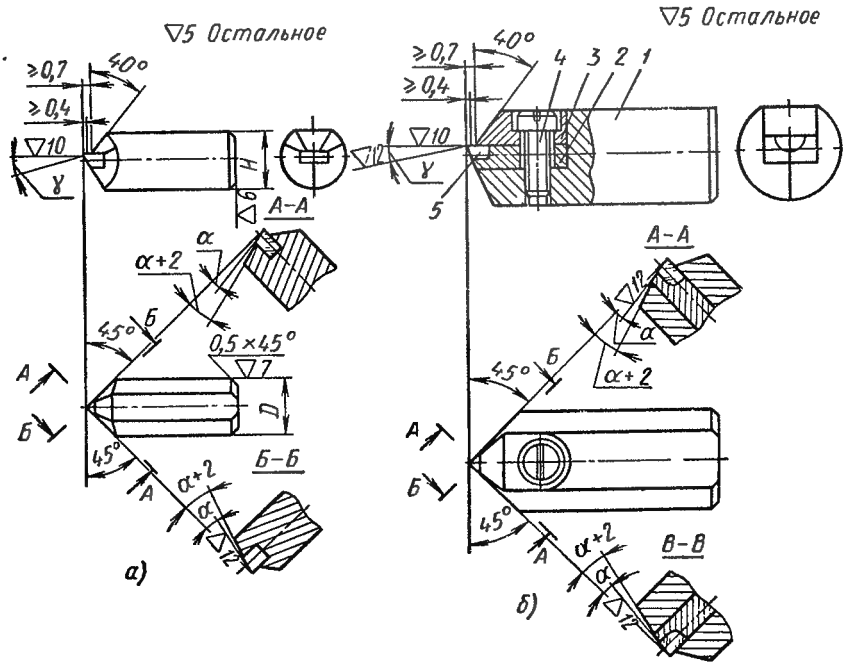
Примечание. Главный угол в плане 30—90°; вспомогательный угол в плане 0—10°, радиус при вершине 0,2—0,8 мм.

на геометрию режущей части резцов (табл. 42). Задний и передний углы выполняют, как правило, по фаске 0,1—0,4 мм на задней поверхности и до 0,6 мм по передней поверхности. При растачивании отверстий во избежание затирания задний угол выбирают большим и он может достигать 20° для отверстий малого диаметра.

При обработке деталей из материалов меньшей твердости передние и задние углы выбирают бо́льшими. При этом необходимо учитывать, что для обеспечения требуемой прочности режущей кромки

Рис. 102. Алмазные резцы:

1 — оправа; *2* — вставка; *3* — накладка; *4* — винт; *5* — алмаз



угол заострения должен быть не менее 90°. У резцов с меньшим углом заострения очень сложно, а зачастую и невозможно получить режущую кромку необходимого качества. Уменьшение главного и вспомогательного углов в плане способствует упрочнению режущей кромки. Для проходных резцов уменьшение вспомогательного угла в плане способствует к тому же снижению шероховатости обработанной поверхности. Радиус закругления, при вершине равный 0,2—0,8 мм, повышает ее прочность и снижает шероховатость обработанной поверхности. Малая величина основного и вспомогательного углов в плане, при обработке такими резцами, позволяет получить высокий класс шероховатости обрабатываемой поверхности, однако для их использования необходима высокая жесткость системы СПИД.

При конструировании резцов необходимо учитывать, что их геометрические параметры должны в некоторой степени приближаться к форме кристалла алмаза, из которого предполагается изготовить резец. Длина режущей кромки алмазных резцов зависит от размера кристалла. На основании многочисленных экспериментальных данных получена эмпирическая зависимость длины режущей кромки от массы кристалла алмаза, равной 0,1—3 карата: $l = 5{,}4G - 0{,}86G^2$ мм. Существуют специальные таблицы для определения массы кристалла алмаза в зависимости от требуемой длины режущей кромки.

Конструкции станка и крепежного приспособления оказывают существенное влияние на форму и размеры державки алмазного резца.

Державки должны прочно удерживать ограненный кристалл алмаза, который ориентируется по отношению к обрабатываемому материалу так, чтобы износ режущей части происходил в «твердом» или близком к «твердому» кристаллографическому направлению. Конструкция державки должна быть такой, чтобы кристалл алмаза после затупления можно было переточить.

В настоящее время наибольшее распространение получили два способа закрепления алмаза в державке: метод пайки и механический метод. При пайке (горячий метод) окончательно обработанный кристалл вначале зачеканивают в закрытом пазу, а затем промежутки заполняют припоем на медной, чаще на серебряной основе (рис. 102, *а*). Для изготовления державок применяют стали 30—40 и 12ХН3А, хорошо поддающиеся чеканке. Этот метод очень прост, не требует применения специального оборудования, позволяет изготовлять резцы из малых кристаллов алмаза. Однако он не лишен недостатков: при зачеканке могут появиться трещины, ухудшается качество режущей кромки под воздействием высокой температуры, пайки, сложно извлечь алмазное зерно для восстановления режущей кромки.

Закрепление кристалла алмаза с помощью механического прижима (рис. 102, *б*) получило более широкое распространение. При этом алмазное зерно, как правило, предварительно соединяют с металлокерамической пластинкой (подушкой) и вместе с ней устанавливают

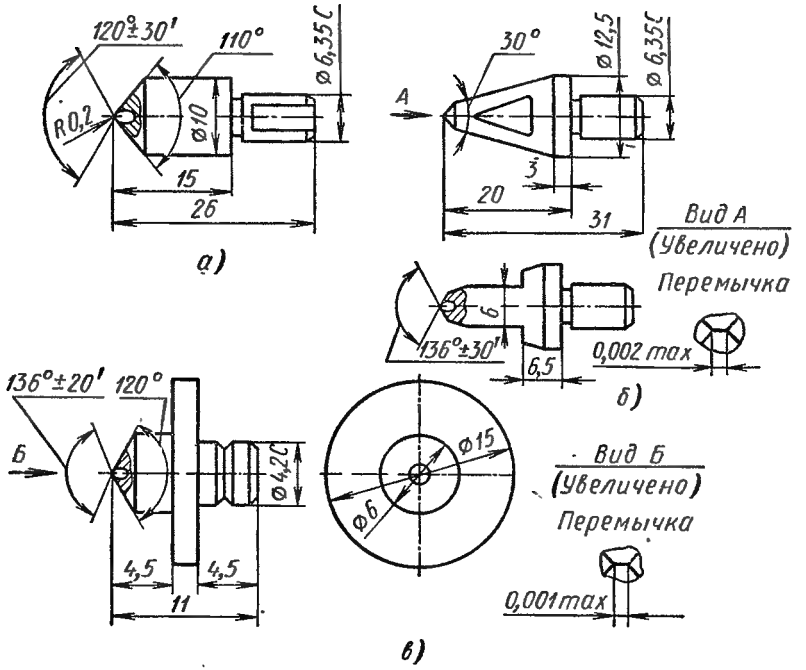


Рис. 103. Наконечники для измерения твердости:

а — к прибору Роквелла; *б* — к прибору Виккерса; *в* — к прибору для измерения микротвердости

в открытое гнездо державки. При механическом закреплении алмаз легко извлекается из державки резца при необходимости восстановления режущих кромок. Недостатки этого метода: увеличиваются размеры резцов, необходимо применение более крупных кристаллов алмаза, примерно $^2/_3$ кристалла алмаза закрыто подушкой и прижимной планкой.

Алмазный контрольно-измерительный инструмент служит для измерения твердости, шероховатости обработанной поверхности и контроля размеров.

Инструмент для измерения твердости. Современные наиболее распространенные методы контроля твердости материалов основаны на измерении путем царапания или вдавливания в испытуемый материал более твердого наконечника. Метод царапания состоит в измерении силы, прикладываемой к алмазному наконечнику с конической вершиной и углом конуса 90°, который, перемещаясь по полированной поверхности испытуемого материала, дает черту шириной 0,01 мм. Ввиду большой трудоемкости этот метод применяется очень редко. Широкое применение нашел метод измерения твердости, основанный на статическом вдавливании алмазного наконечника в испытуемый материал (рис. 103). Вершина наконечника может быть в виде конуса с углом 120° (прибор типа Роквелла) или четырехгранной пирамиды с углом 136° (прибор типа

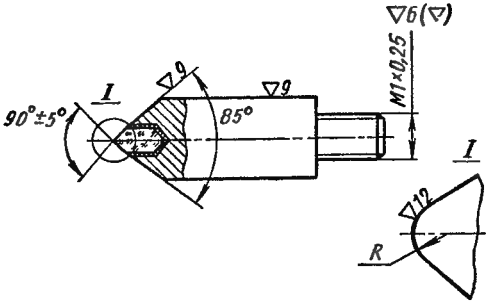


Рис. 104. Игла для измерения шероховатости поверхности

Виккерса и прибор для измерения микротвердости ПМТ-3). Наконечник представляет собой оправку, по оси которой со стороны одного из торцов закреплено алмазное зерно с обработанной соответствующим образом вершиной. Форма и размеры хвостовой части оправки определяются формой и размерами установочного места на измерительном приборе.

Инструмент для измерения шероховатости поверхности. Одним из наиболее распространенных методов измерения микронеровностей обработанной поверхности является метод, основанный на ощупывании поверхности острой иглой. Измерение производится на профилометрах типа ПЧ-2, КВ-4, КВ-7, или профилографах типа ИЗП, 43П17. Для обеспечения высокой точности и стабильности измерений необходимо, чтобы острые иглы обладали высокой стойкостью. Этим требованиям отвечают алмазные иглы (рис. 104). Рабочей частью иглы является кристалл алмаза массой 0,01—0,02 карата, закрепленный по оси оправы со стороны торца, имеющий вершину, выполненную в виде конуса, с углом 90±5°, сопряженного со сферой с радиусом скругления 2—10 мкм. Вершину конуса закругляют для уменьшения величины внедрения ощупывающей иглы в тело детали, так как внедрение вносит искажения между действительным и измеренным микрорельефами поверхности. Установлено, что игла с радиусом сферы на вершине конуса 10 мкм доходит до дна впадины большинства микронеровностей на поверхностях с шероховатостью 5—12-го класса. Иглы изготовляют из прозрачных и полупрозрачных кристаллов с незначительными включениями, расположенными на расстоянии не менее $^1/_3$ длины кристалла. Полированная поверхность иглы должна быть без рисок, сколов, трещин и других дефектов. Предельное отклонение вершины алмаза от оси хвостовика должно быть не более 0,05 мм.

Инструмент для контроля размеров. Автоматизация процессов производства ставит задачу о необходимости контроля размеров обрабатываемой детали непосредственно в процессе изготовления. При этом контроль может быть осуществлен методом прямого измерения размеров детали (прямой метод) или методом контроля положения рабочей поверхности обрабатывающего инструмента (косвенный метод). Как в первом, так и во втором случае необходимы наконечники с высокой твердостью, износостойкостью и коррозионной стойкостью, низким коэффициентом трения его рабочей поверхности. Такими качествами в полной мере обладают алмазные наконечники. Для изготовления алмазных наконечников используют кристаллы различной формы массой 0,005—0,3

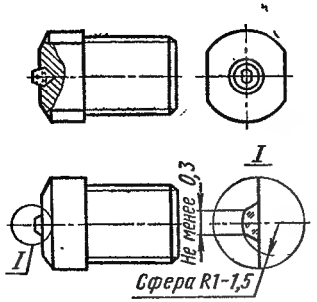


Рис. 105. Наконечник для активного контроля размеров детали]

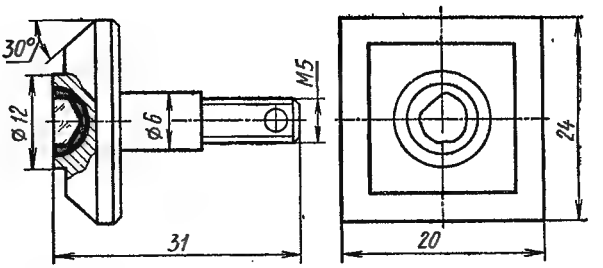


Рис. 106. Алмазный компенсатор

карата — для приборов активного контроля и свыше 1,5 карата — для приборов с косвенным методом измерения. Алмазные контактные наконечники для активного контроля при прямом методе измерения показаны на рис. 105. На рис. 106 показан алмазный наконечник — компенсатор к зубошлифовальным станкам.

Алмазные волоки. В настоящее время проволоку диаметром до 0,03 мм практически нельзя получить без применения алмазных волок. Алмазные волоки, стойкость которых в сотни раз выше твердосплавных, позволяют получать проволоку с большей точностью при большей скорости волочения. Усилие волочения через алмазные волоки значительно ниже по сравнению с волоками из других материалов, адгезионные связи и коэффициент трения алмаза с протягиваемыми металлами значительно меньше, чем у других материалов. Высокое качество рабочей поверхности, наряду с вышеуказанными свойствами, значительно уменьшает также количество отрывов в процессе волочения.

Алмазная волока представляет собой металлическую оправку, в центральной части которой закреплен кристалл алмаза, имеющий отверстие необходимого профиля. Форма и размеры профиля канала, размеры диаметров отверстий, масса кристаллов алмазов, размеры оправок и другие технические требования регламентированы ГОСТ 6271—68. ГОСТ предусматривает три типа волок, каждый из которых предназначен для определенной группы металлов. Волоки типа М с диаметром калибрующего отверстия не более 2 мм используются для волочения металлов и сплавов, таких как медь, серебро, золото, с временным сопротивлением до 50 кгс/мм^2. Волоки типа Т диаметром до 1 мм предназначены для холодного волочения латуни, бронзы, никеля и др. сплавов с временным сопротивлением 50—100 кгс/см^2; диаметром до 0,5 мм — для холодного волочения стали, нихрома и других материалов с временным сопротивлением 100—200 кгс/см^2 и горячего волочения вольфрама, молибдена, иридия и т. п. Волоки типа С диаметром до 0,5 мм применяются при волочении высокопрочных металлов и сплавов с временным сопротивлением более 200 кгс/мм^2.

Канал алмазной волоки (рис. 107) состоит из следующих участков: входной распушки *a*, смазочного *b* и рабочего *c* конусов, ка-

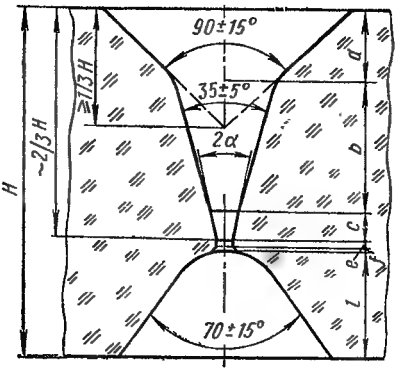


Рис. 107. Форма канала волоки

либрующей зоны *e*, обратного конуса *f* и выходной распушки *l*. Входная распушка и смазочный конус предназначены для обеспечения легкой заправки заготовки и подачи смазки в рабочую зону. Они не зависят от свойств обрабатываемого материала и их углы составляют 90 ± 15° для входной распушки и 35 ± 5° для смазочного конуса. Волоки с диаметром калибрующего отверстия более 0,5 мм выполняются без входной распушки. Наиболее ответственным участком канала является рабочий конус, высота и геометрия которого выбираются в зависимости от свойств обрабатываемого материала. Высота рабочего конуса при волочении более твердых материалов выбирается большей, а угол меньшим, чем при волочении мягких материалов. В зависимости от физико-механических свойств протягиваемого материала угол рабочего конуса изменяется в пределах 10—18°, а высота (0,7 — 1,5) *d*. Калибрующая зона представляет собой цилиндрический поясок, высота которого выбирается большей при протягивании более твердых материалов. Высота калибрующей зоны выбирается в пределах (0,3÷1) *d*.

Для изготовления волок используют высококачественные природные алмазы, обеспечивающие получение формы канала волоки в соответствии со стандартом. Поверхность канала волоки должна быть гладкой без резких переходов, поперечных колец, рисок и трещин. Поверхности рабочей и калибрующей зон, а также обратного конуса должны быть отполированы до блеска. В смазочном и рабочем конусах, а также калибрующей зоне не допускаются микротрещины, видимые при десятикратном увеличении. В зависимости от диаметра отверстия волоки изготовляют из кристаллов алмаза массой 0,03—4 карата. В оправке кристалл алмаза закрепляют так, чтобы ось канала волоки была концентрична оси оправы и перпендикулярна торцу. Оправы для алмазных волок типов Т и С, а также типа М диаметром свыше 0,5 мм изготовляют из материала твердостью не ниже *НВ* 90. Твердость материала оправы для волок типа М диаметром до 0,5 мм и материала для закрепления алмаза в оправе должна быть не ниже *НВ* 75. Кристаллы алмаза для волок диаметром более 0,5 м крепят методом порошковой металлургии.

Алмазные стеклорезы. Для изготовления стеклорезов используют как природные, так и синтетические алмазные зерна массой 0,02—0,2 карата. Стеклорезы бывают двух типов: с естественными и искусственными режущими ребрами.

Для изготовления алмазных стеклорезов с естественными режущими ребрами используют прозрачные и полупрозрачные различного цвета кристаллы алмаза с плотной структурой в виде много-

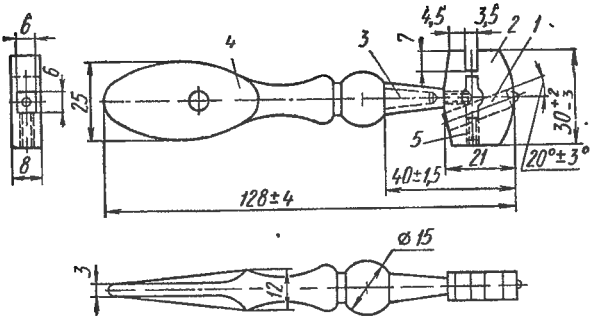


Рис. 108. Алмазный стеклорез

гранников с острыми ребрами. Для стеклорезов с искусственными режущими ребрами используют кристаллы с более тупыми ребрами, в том числе ранее использованные для стеклорезов с естественными режущими ребрами, осколки разрушенных крупных природных кристаллов и крупные кристаллы синтетических алмазов.

Стеклорез (рис. 108) состоит из алмаза, ограненного в виде четырехгранной пирамиды и закрепленного в стальном алмазодержателе *1*, молоточка *2*, хвостовика *3*, ручки *4* и винта. Алмазодержатель с закрепленным алмазом устанавливают в наклонном отверстии молоточка и крепят винтом. Алмазное зерно имеет четыре режущих ребра, которые параллельны соответствующим боковым плоскостям квадратного резцедержателя. Ось квадратного отверстия в молоточке наклонена к оси стеклореза под углом 20°. После установки алмазодержателя в отверстие молоточка режущая грань должна быть параллельна боковой плоскости молоточка. После затупления одного из ребер алмазодержатель легко поворачивается на 90° и работа выполняется следующим ребром. Вершина кристалла алмаза должна выступать из корпуса молоточка не более чем на 2 мм. Алмазные стеклорезы с искусственными режущими ребрами регламентированы ГОСТ 10111—62. ГОСТом предусмотрены стеклорезы с призматическим алмазодержателем (рис 109, *а*) и с цилиндрическим (рис. 109, *б*). Стеклорезы с круглым алмазодержателем используют для фигурной резки стекла на специальных станках. Для устранения поломки алмаза радиус фигурной резки необходимо согласовывать

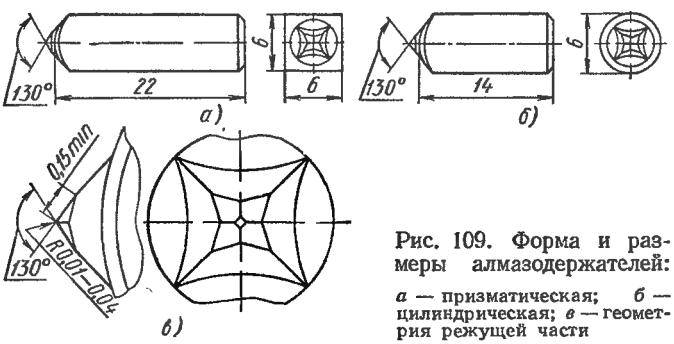


Рис. 109. Форма и размеры алмазодержателей:

а — призматическая; *б* — цилиндрическая; *в* — геометрия режущей части

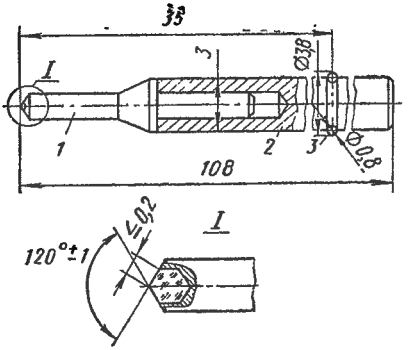


Рис. 110. Граверная игла:

1 — наконечник с иглой; *2* — стержень; *3* — упорное кольцо

с длиной режущей кромки алмазного зерна. Чем больше эта длина, тем больше должен быть радиус фигурной резки.

Качества резки листового стекла зависит от правильной установки стеклореза и прилагаемого к нему усилия. Усилие должно быть таким, чтобы после резки на стекле оставался ровный след в виде тонкой линии. Получившаяся в процессе резания широкая царапина и образование стекольной пыли говорят о том, что стеклорез следует ставить перпендикулярно к плоскости стекла и вести в направлении стрелки, нанесенной на молоточке. Правильная резка сопровождается характерным звенящим звуком.

Чтобы сохранить стеклорез от повреждения, не рекомендуется: водить стеклорезом по одному и тому же месту несколько раз; резать мокрое и загрязненное стекло; резать матовое стекло; ударять кристаллом алмаза по стеклу или другому материалу; доводить линию реза до самой кромки стекла (необходимо оставить перемычку 1—2 мм). При соблюдении правил пользования одним стеклорезом из синтетического алмаза можно получить линию реза стекла до 40 000 пог. м.

Алмазные граверные иглы в отличие от стеклорезов обеспечивают четкую бороздку на поверхности при минимальной концентрации напряжений по этой линии. Применение алмаза в качестве рабочего элемента позволяет получить штрихи шириной 0,5 мкм (дифракционные решетки). Для изготовления алмазных граверных игл используют качественные кристаллы или осколки алмазов с естественными режущими ребрами или создаваемые путем огранки. В последнее время расширяется применение граверных игл из синтетических алмазов (рис. 110).

Изготовление инструмента из необрабатываемых кристаллов алмаза

Из необрабатываемых кристаллов алмаза изготовляют преимущественно многокристальные правящие и буровые инструменты и в небольшом количестве алмазы в оправах, применяемые для правки абразивных кругов. Термин «необрабатываемые» в данном случае применяется условно для обозначения кристаллов, которые не подвергались огранке, электрохимической или ультразвуковой обработке. В то же время с целью улучшения качества кристаллов алмаза, используемых, например, для буровых инструментов, алмазное сырье подвергают овализации, полированию и т. п., что позволяет применять для изготовления инструментов низкосортные

природные алмазы. Инструменты из необрабатываемых кристаллов, алмаза, как и алмазные абразивные состоят из корпуса и рабочего слоя, в котором закреплены алмазы.

В качестве связки, удерживающей алмазы, применяют наиболее износостойкие металлокерамические материалы, изготовляемые из твердосплавных смесей. Технология изготовления деталей из твердосплавных смесей включает спекание при температурах, достигающих 1450° С, что значительно выше термостойкости алмазов. Поэтому при производстве алмазного бурового и правящего инструмента используют в основном пропитку предварительно спрессованной твердосплавной смеси (каркаса) легкоплавкой составляющей — медью или сплавами на ее основе.

Пропитка как технологический процесс изготовления алмазного инструмента имеет существенное преимущество по сравнению с другими методами порошковой металлургии. Практически беспористые материалы получают при пропитке без использования высоких давлений и специальной оснастки. Основные этапы процесса пропитки: изготовление корпуса, подготовка алмазов, приготовление шихты для брикетирования каркаса, формование с укладкой алмазов, пропитка, соединение с корпусом и окончательная механическая обработка.

Приготовление шихты. В качестве основных материалов при изготовлении коронок и правящих инструментов используют алмазы, твердосплавные порошки, медь для пропитки, стальной прокат для корпусов и др. Для правящего и бурового инструмента применяют технические природные алмазы, относящиеся в соответствии с классификацией к четвертой и пятой категории, массой 0,008—0,05 карат и для долот 0,08—0,5 карат. Шихта, из которой прессуется рабочий слой, приготовляется из порошков твердого сплава ВК6 и ВК8. Корпуса бурового и правящего инструмента изготовляют из сталей 20 и 30. При подготовке оснастки, оборудования и шихты используют также вспомогательные материалы — марлю, ветошь, этиловый спирт, бензин, каучук и др.

Приготовление шихты для формования каркаса алмазоносного слоя правящих карандашей и коронок имеет свои особенности. Твердосплавные порошки плохо прессуются без введения клеящих добавок — пластификаторов. В качестве пластификатора употребляют 10—12%-ный раствор каучука в бензине. Для растворения каучук нарезают на куски и заливают бензином из расчета 1 л на 80 г каучука. В результате получают густую массу, которая должна храниться в герметичной таре. Пластифицирование шихты заключается в тщательном смешивании твердосплавного порошка с раствором. На 1 кг порошка добавляют 60 г раствора, затем протирают смесь через сито с размером ячеек 0,2—0,5 мм и сушат на воздухе. Пластифицирование обеспечивает возможность прессования брикетов при низких давлениях.

Формование алмазоносного слоя бурового и правящего инструмента включает операции подготовки пресс-формы, засыпки шихты, укладки алмазов, формования и извлечения брикета из пресс-формы.

Изделия простой формы, например вставки правящих карандашей, прессуют в металлических пресс-формах. Формующие полости пресс-форм для брикетирования вставок правящих карандашей полируют до получения зеркальной поверхности, к которой не прилипает шихта. При расположении алмазов в несколько слоев навеску шихты разбивают на несколько частей и после засыпки и подпрессовки вручную первой укладывают слой алмазов по заданной схеме. Для удержания алмазов во время укладки используют пинцеты или вакуумные наконечники После укладки одного слоя алмазов засыпают следующую навеску шихты, подпрессовывают ее и повторяют описанные выше операции. Окончательно прессуют вставку карандаша на гидравлическом прессе. Давление прессования 500—750 кгс/см². Отформованную вставку передают затем на пропитку. Аналогичные операции и оснастку используют при формовании алмазоносного слоя небольших по размерам и простых по форме буровых коронок, не требующих специальной схемы укладки.

Значительно сложнее изготовить инструмент из мелких алмазов с заданной схемой их распределения и расположением вершин над торцом матрицы. При прессовании в стальных пресс-формах с гладкими поверхностями алмазы смещаются, что приводит к искажению схемы укладки. В настоящее время разработана технология формования алмазоносных матриц, обеспечивающая получение любых заранее заданных профилей рабочего торца матрицы, схемы размещения и величины выступания алмазов. Для этого укладку алмазов, прессование шихты и пропитку матриц производят в специальных графитопластовых пресс-формах разового пользования.

Пресс-формы изготовляют из смеси порошка электролизированного кокса со связующим ПБ в количестве 10—15% по массе. Перед смешиванием графит дробят, просеивают через сито и сушат. Графитопластовые пресс-формы изготовляют методом горячего прессования. Давление прессования 500 кгс/см², температура 180° С, время изотермической выдержки 2 мин на 1 мм высоты формы. Пуансон для прессования графитовой формы полностью повторяет профиль коронки. Его изготовляют выдавливанием в стальной закаленной матрице или методом порошковой металлургии. При прессовании таким пуансоном в полости графитопластовой формы образуется углубление, с высокой точностью повторяющее рабочую часть пуансона. Последующей механической обработки графитопластовая форма не требует. Перед укладкой алмазов полость формы покрывают тонкой клеющей пленкой 5%-ного раствора синтетического каучука в бензине, которая удерживает алмазы в требуемом положении при укладке и после засыпки шихты.

После укладки алмазов *2* в соответствии со схемой размещения в углубления графитовой формы *1* производят засыпку шихты и прессование при давлении 500—750 кгс/см². Роль пуансона при этом выполняет корпус коронки *3* (рис. 111). Для предотвращения разрыва графитовых форм во время прессования их обжимают разрезным конусным стальным кольцом *4* в конусной обойме *5*. Применение разовых пресс-форм упрощает технологию укладки, обеспе-

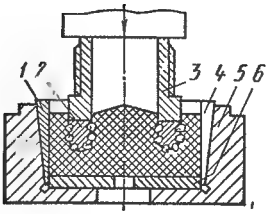


Рис. 111. Прессование алмазоносного слоя буровой коронки:

1 — графитовая форма; *2* — алмазы; *3* — корпус коронки; *4* — конусное разрезное кольцо; *5* — стальная обойма; *6* — прокладка

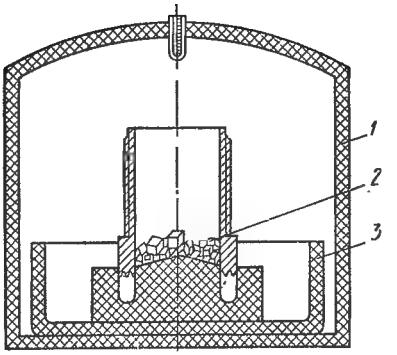


Рис. 112. Схема пропитки коронок:

1 — муфель печи; *2* — частицы меди; *3* — графитовая лодочка

чивает точные параметры режущей части алмазного инструмента и, что особенно важно, повторение этих параметров при массовом производстве коронок.

Пропитка. Заполнение пор спрессованного брикета расплавленным металлом происходит под влиянием капиллярных сил в течение очень короткого времени. Частицы алмаза после пропитки прочно закрепляются в матрице (связке), состоящей из частиц металлического порошка, образующих каркас, и скрепляющего эти частицы пропитывающего металла. К материалу каркаса и пропитывающего сплава предъявляют определенные требования: температура плавления металла каркаса должна быть значительно выше температуры плавления пропитывающего сплава, который к тому же должен хорошо смачивать частицы каркаса.

Для обеспечения равномерной плотности брикета и предотвращения усадки количество меди для пропитки должно быть точно рассчитано. По известной пористости брикета навеска пропитывающего сплава

$$G_{\text{пр}} = \frac{V_{\text{к}} \gamma_{\text{пр}} П}{100} K,$$

где $V_{\text{к}}$ — объем каркаса в см^3;

$\gamma_{\text{пр}}$ — плотность пропитывающего сплава в г/см^3;

$П$ — пористость в объемных процентах;

K — коэффициент запаса; $K = 1{,}03 \div 1{,}05$.

Величину навески корректируют по результатам пропитки опытной партии инструментов. Для пропитки медь нарезают мелкими пластинами размером 3—5 мм.

Пропитка производится в специальных печах в герметичных муфелях *1* (рис. 112) в среде водорода. Восстановительная среда улучшает условия пропитки, способствует лучшему смачиванию частиц каркаса пропитывающим сплавом. Изделия помещают в графитовые лодочки *3* и проталкивают в рабочее пространство печи. Пропитывающий сплав *2* укладывают на вставки правящих карандашей или

внутрь коронки. Производится медленный нагрев изделий в среде водорода до температуры 800° С и затем быстрый, в течение 10 мин — до 1100—1150° С. Расплавленная медь под действием сил капиллярного натяжения заполняет поры каркаса. Небольшой перегрев выше точки плавления меди необходим для придания ей высокой степени жидкотекучести, что улучшает заполнение пор. Пропитка заканчивается охлаждением в холодильнике печи в водороде до комнатной температуры.

Соединение с каркасом. При изготовлении буровых коронок одновременно с пропиткой происходит припайка слоя к корпусу. Вставки алмазных карандашей после шлифования цилиндрической части на бесцентрово-шлифовальном станке запрессовываются или запаиваются в стальной корпус, размеры которого определены ГОСТ 607—63. Корпуса и рабочий слой обрабатывают на токарных, фрезерных, шлифовальных и других металлообрабатывающих станках, для образования на коронках резьбы, пазов для промывочной жидкости и т. д. После контроля инструменты упаковывают для отправки потребителю.

Изготовление инструмента из шлифуемых кристаллов алмаза

При изготовлении алмазного инструмента из шлифуемых кристаллов выполняют следующие операции: отбор кристаллов соответствующего размера и качества, обработку их и закрепление в корпусе или оправе. Размеры и форму кристалла выбирают так, чтобы объем механической обработки алмаза был минимальным. Размер кристалла определяется конструкцией и назначением инструмента. Например, при изготовлении стеклорезов, у которых рабочей частью алмаза является небольшая по размеру вершина пирамиды, могут быть использованы небольшие кристаллы размером до 0,2 карата. Волоки с размером канала 0,01—1,2 мм изготовляют из алмазов массой 0,08—4 карата. Качество кристаллов должно быть высоким. В кристаллах не допускаются дефекты: трещины, раковины, включения и внутренние напряжения. Поверхностные трещины в кристаллах обнаруживают визуально, для чего кристалл покрывают люминофором и просматривают его на микроскопе МБС-2 в ультрафиолетовом свете. Если в кристалле имеются трещины, они будут отчетливо видны. Внутренние включения могут быть определены просмотром под микроскопом при обычном освещении, а напряжения — при просмотре в поляризованном свете. В алмазах с дефектами из-за интерференции в местах с внутренними напряжениями наблюдается свечение тем более интенсивное, чем выше напряжение. Качественное сырье передают для обработки.

Закрепление кристаллов. В процессе обработки кристаллы алмаза прочно закрепляют в специальных оправках и корпусах. Различают временное закрепление алмазов в технологических державках во время обработки и постоянное — в корпусе инструмента. При временном закреплении должна быть обеспечена возможность огранки

максимального количества поверхностей и быстрой переустановки кристалла без разрушения. При постоянном закреплении основные требования заключаются в точной установке кристалла относительно посадочных мест корпуса и в надежном удержании в процессе эксплуатации. В первом случае кристаллы закрепляют твердеющими смесями и низкоплавкими припоями, во втором — зачеканкой в отверстии корпуса, пайкой твердыми и адгезионно-активными припоями.

Временное закрепление алмазов применяют, когда для последующих операций необходима его переустановка, например, при разрезке кристаллов, огранке установочных плоскостей, обточке кристаллов для придания им конусной формы и т. п. Кристаллы закрепляют в технологических державках. В качестве клеящего вещества может быть использован, например, материал, в состав которого входят гипс и клей (в соотношении 1 : 1), приготовленный из смеси костного клея и «контакта Петрова» (ГОСТ 463—53). Для приготовления состава клей растворяют в воде и после набухания в течение 18—24 ч нагревают в водяной бане. Полученную однородную массу охлаждают до 40° С и добавляют в нее небольшими порциями «контакт Петрова» в количестве 40,7% по массе. Состав используют в свежеприготовленном виде. Для отверждения клейкой массы после установки кристалла в оправке ее нагревают в термошкафу до температуры 160° С в течение 5 мин. Кристалл может быть закреплен также в смеси эпоксидной смолы и отвердителя — дициандиамида. Эта смесь твердеет при температуре 180° С. Для отделения кристалла, приклеенного к оправке, его нагревают до 300° С.

Кристалл может быть закреплен в оправке для обработки легкоплавким припоем, состоящим из одной части олова и двух частей свинца. Припой имеет температуру плавления 215° С. При нагреве оправки припой размягчается и кристалл легко поворачивается и устанавливается в новое положение для огранки. При остывании припой затвердевает и закрепляет кристалл. Для шлифования плоскостей кристалл может быть запрессован в брикет из металлического порошка, например, связки М1. После обработки брикет легко разрушается.

Постоянное закрепление кристалла в рабочем положении в корпусе выполняют твердым припоем или с использованием методов порошковой металлургии. В первом случае сверлят отверстие для установки кристалла и зачеканивают кристалл кернером сначала в четырех, а потом в двенадцати точках. После этого заливают кристалл в отверстии припоем марки ПСр45. Могут быть использованы и другие составы, в том числе латунный припой марки ЛС 59-1. В последнее время для пайки кристаллов применяют адгезионно-активные к алмазу сплавы, содержащие в качестве добавок титан или цирконий. Такие припои в расплавленном состоянии смачивают поверхность кристаллов алмаза, что увеличивает прочность его закрепления. Пайка производится в вакуумных печах. Прочное закрепление алмазов может быть осуществлено также

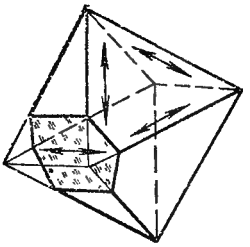
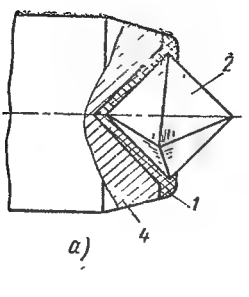


Рис. 113. Направления обработки кристаллов



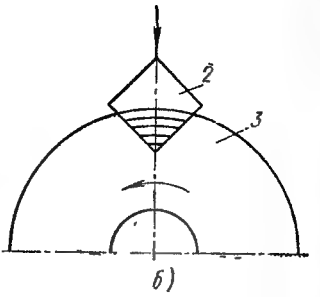


Рис. 114. Резка кристаллов алмаза:

а — закрепленне кристаллов в промежуточной оправке; *б* — схема правильной установки кристалла откосительно диска; *1* — клей; *2* — кристалл алмаза; *3* — диск из бронзы; *4* — промежуточная оправка

в металлокерамическом материале. Для этого алмаз устанавливают в пресс-форме в требуемом положении. Затем засыпают шихту, приготовленную из металлических порошков, и прессуют ее. После нагрева для спекания в жаропрочной пресс-форме вторично уплотняют брикет. В качестве шихты может быть использована связка М1. Закрепленные алмазы подвергаются обработке для придания им требуемой формы.

Разделение кристаллов. Для изготовления инструмента используют стандартное сырье, рассортированное по форме, размерам, наличию дефектов. В некоторых случаях кристаллы подвергают разрезке или раскалыванию, что увеличивает коэффициент использования сырья и уменьшает объем последующей механической обработки. При разрезке, так же как и при других операциях механической обработки алмаза, следует учитывать анизотропию свойств кристаллов в различных направления. Кристалл ориентируют так, чтобы он разрезался в «мягком» направлении. Под этим подразумевают направление с меньшей плотностью расположения атомов. На рис. 113 показаны длинными стрелками «мягкие» направления обработки для некоторых плоскостей кристаллов правильной октаэдрической формы. Направление обработки выбирают, ориентируясь по форме кристалла или с использованием рентгена. После ориентации и определения возможного направления разрезки кристалл закрепляют клеем в промежуточной оправке (рис. 114, *а*). Схема правильной установки кристалла для резки показана на рис. 144, *б*. Алмазы разрезают на многосекционных станках.

Для разрезки используют бронзовые диски диаметром до 100 мм из оловянистой бронзы Бр. ОФ 6,5-0,15, шаржированные микропорошками синтетических алмазов АСН 20/14. Шпиндель, на котором устанавливается диск, должен вращаться с частотой 7—10 тыс. об/мин. Толщину диска выбирают в зависимости от размера разрезаемого кристалла в пределах 0,04—0,15 мм. В процессе резки через каждые 10—15 мин диск шаржируют пастой, получаемой смешиванием алмазов с оливковым маслом (5—6 капель на 1 карат). Расход алмазов составляет примерно 0,05 каратов на разрезку

кристалла размером в 1 карат. Разрезка производится следующим образом. После установки на одну из секций станка оправки с закрепленным в ней алмазом производят начальную подрезку кристалла более толстыми, чем при разрезке дисками. Диски закрепляют между фланцами так, чтобы край выступал на 1,5—2 мм. При нагрузке на диск до 120 гс кристалл прорезают на глубину 1—1,5 мм. Затем подрезной диск заменяют рабочим, величина расположения которого над фланцами должна обеспечивать разрезку всего кристалла (табл. 43).

Таблица 43

Режимы резки кристаллов

Масса кристалла в каратах	Толщина диска в мм		Нагрузка при распиливании в гс	Масса кристалла в каратах	Толщина диска в мм		Нагрузка при распиливании в гс
	подрезного	рабочего			подрезного	рабочего	
До 0,10 0,10—0,25 0,25—0,50	0,06	0,05	120 120—130 130—140	2,0—2,99 3,0—3,99	0,08	0,07	220—240 240—260
0,50—0,75 0,75—0,99 1,0—1,99	0,07	0,06	140—160 160—180 180—220	4,0—4,99 Св. 5	0,09	0,08	260—280 280—300

Особую осторожность следует соблюдать при разрезке кристаллов с дефектами: инородными включениями, трещинами и т. д. При наличии трещины на одной из вершин алмаза, разрезку начинают с этой вершины. В каждом случае при распиливании должны быть учтены индивидуальные особенности кристалла. Разрезка алмазов — длительная операция: на разрезку площади 1 мм^2 уходит в среднем 3—10 мин.

Более производительным способом разделения кристаллов является раскалывание. Обладая совершенной спайностью, кристалл алмаза легко раскалывается по определенным плоскостям, называемым плоскостями спайности. У октаэдра эти плоскости расположены параллельно его граням (рис. 115). Для раскалывания алмаза используют изготовленный из закаленной инструментальной стали (*HRC* 59—62) нож (рис. 116). На кристалле наносят осколком риску в направлении плоскости спайности. В образовавшееся углубление опускают острие ножа. Легким ударом деревянного бойка кристалл разделяют на части. Необходимо отметить, что операция раскалывания кристалла доступна лишь рабочим, имеющим большой опыт.

Обработка кристаллов выполняется в основном механическим путем. В качестве инструмента используют алмазные круги и металлические диски, иглы и притиры, шаржированные микропорошками синтетических алмазов. Для предварительной обработки могут

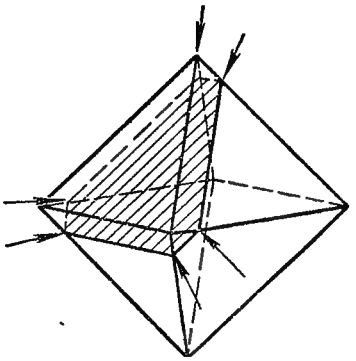


Рис. 115. Плоскость спайности кристалла октаэдрической формы

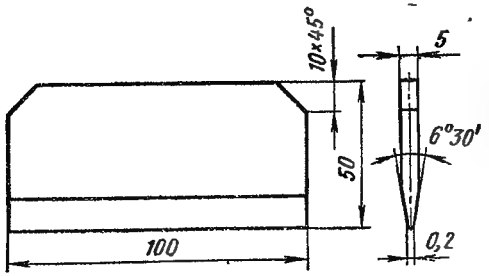


Рис. 116. Нож для раскалывания алмазов

быть использованы алмазные круги на органической и металлической связке.

Плоские поверхности кристаллов алмазов обычно шлифуют на ограночных станках (рис. 117) с применением горизонтально установленного вращающегося диска, изготовленного из мелкозернистого пористого чугуна.

Частота вращения шайбы должна быть такой, чтобы обеспечивать скорость шлифования 25—45 м/с. Зону шлифования кристалла на чугунном диске обычно ограничивают концентрическими окружностями диаметром 200—250 и 300—400 мм. Биение диска по торцу, контролируемое индикатором, не должно превышать 0,005 мм, а шероховатость рабочей поверхности перед шаржированием должна быть порядка 7—8-го класса. Диск должен быть тщательно отбалансирован.

Важной операцией, от которой во многом зависит эффективность обработки кристалла, является шаржирование диска, выполняемое в следующей последовательности. На поверхности диска наносят царапины для лучшего удержания частиц алмаза. Затем поверхность тщательно протирают тканью, смоченной в спирте. Смесь, приготовленную из микропорошков синтетических алмазов с оливковым маслом, наносят на диск из расчета 0,001—0,006 каратов на квадратный сантиметр поверхности и втирают твердосплавной пластинкой или роликом. Обрабатываемый алмаз устанавливают в приспособление (рис. 118), удерживающее и

Рис. 117. Обработка кристаллов алмаза на ограночном станке

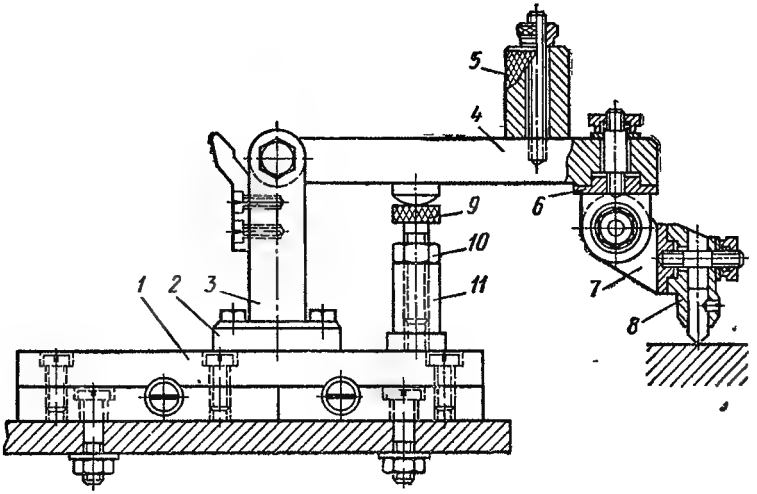


Рис. 118. Приспособление для ориентирования кристалла алмаза при обработке:

1 — перемещающиеся салазки; *2* — ползун; *3* — стойка; *4* — качающееся коромысло; *5* — груз; *6—8* — поворотные угольники; *9* — винтовой упор; *10* — контргайка; *11* — стойка

ориентирующее кристалл алмаза в процессе обработки. Во время шлифования алмаз прижимают к поверхности диска и поворачивают вокруг оси, перпендикулярной плоскости диска так, чтобы направление шлифования совпадало с «мягким» направлением. Рекомендуемое давление шлифования 0,15—0,45 кгс/мм². Периодически по мере износа диска его шлифуют, балансируют и шаржируют. Шлифование алмазов выполняют в размер до упора, который выставляют микрометрическим винтом на требуемую величину.

Поверхность диска для обработки разделяют на три зоны: пробную, для шлифования и для полирования. На пробной зоне, расположенной ближе к шпинделю, уточняют или определяют направление шлифования кристалла на диске. В зоне шлифования производят огранку кристалла. Полирование для удаления рисок производят в третьей зоне. Между зонами рекомендуется оставлять кольцо, покрытое порошком. На плоских чугунных шайбах можно обрабатывать радиусные и конические поверхности на алмазе. Для этого используют специальные оправки, поворачивающиеся по отношению к плоскости диска. При огранке конусов кристалл алмаза закрепляют во вращающейся оправке.

Радиусные поверхности на вершинах резцов можно обрабатывать, заменяя в плоском сечении окружность многоугольником, состоящим из отдельных равных хорд протяженностью не более 0,2 мм. Поверхность режущей кромки вершины резца в этом случае ограничивают небольшими плоскостями — фасетами. Количество фасетов обычно выбирают нечетным в зависимости от размера резца.

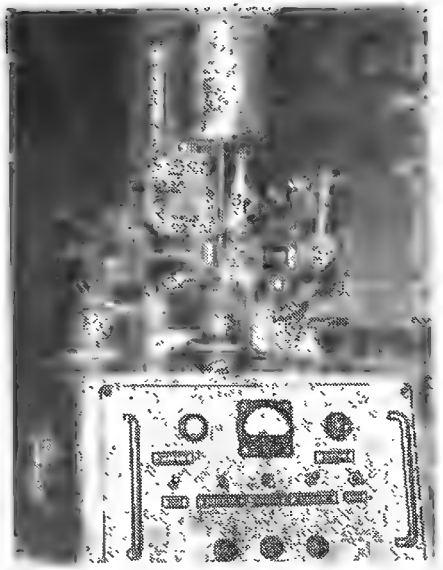


Рис. 119. Ультразвуковой станок для обработки кристаллов алмаза

Для ускорения обработки конуса предварительно выполняют операцию обтачивания. С этой целью кристалл закрепляют в оправке и устанавливают в шпинделе станка. Шпиндель вращается с частотой до 3000 об/мин. К закрепленному кристаллу осторожно подводят резец и обрабатывают конус. В качестве резцов применяют осколки алмаза. Конус может быть прошлифован также алмазными кругами на органической связке. После обдирки или шлифования обрабатывают конус на плоскоограночном станке.

Разработана конструкция приспособления для обработки с высокой точностью конусов из алмаза на ограночных станках. Для этого изделие вращают как вокруг оси обрабатываемого конуса, так и вокруг оси, перпендикулярной к плоскости чугунного диска.

При изготовлении алмазных волок важными операциями являются сверление канала и доводка поверхности. Они выполняются стальными иглами, шаржированными алмазным порошком АСН 14/10, на многоместных станках. Игла вращается с частотой 8—9 тыс. об/мин. Алмазные волоки диаметром свыше 0,15 мм обрабатывают на ультразвуковых станках (рис. 119), где производится обработка входной распушки, смазочного конуса, рабочей зоны, выходной распушки и сверление канала. Для всех этих операций применяют алмазы марки АСН зернистостью 28/20: для полировки калибрующего пояска — АСН 14/10. Сверление выполняют с использованием водной суспензии алмазов (1—1,1 карата на 1 $см^3$ воды). Сверление выполняют острозаточенными конусными или цилиндрическими стальными иглами. Форму заточки иглы выбирают в зависимости от формы обрабатываемой поверхности. Обработку ведут при следующих режимах: частота 22 ± 2 кГц; сила прижима изделия 50—150 гс; частота вращения шпинделя 800 об/мин; амплитуда колебаний инструмента 0,01—0,03 мм. Периодически меняют суспензию и перетачивают иглы. В настоящее время отверстия в каналах волок пробиваются лучом лазера. После обработки рабочей поверхности алмаза и его закрепления выполняют отделочную обработку корпуса, гравировку обозначений, контроль и упаковку инструмента.

Описанные выше приемы обработки кристаллов применяют не только при изготовлении нового, но и при восстановлении рабо-

тавшего, потерявшего в процессе эксплуатации точность формы и размеры инструмента. В процессе использования инструмента с кристаллом алмаза необходимо периодически проверять рабочие поверхности и прочность закрепления кристалла и при малейших дефектах (например, сколах) передавать инструмент для переогранки. Рекуперация отработанных кристаллов алмаза из оправок производится путем растворения металла в смесях кислот, как описано выше для металлических связок.

Глава VI. ИНСТРУМЕНТ ИЗ КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА И НОВЫХ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

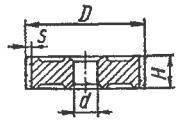
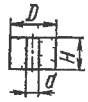
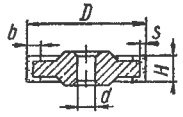
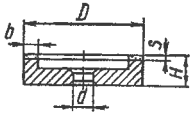
§ 1. АБРАЗИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ИЗ КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА

По своей конструкции инструменты из кубического нитрида бора не отличаются от алмазного абразивного и состоят, как правило, из корпуса и рабочего слоя. Инструмент характеризуется формой и размерами, маркой и зернистостью порошка, концентрацией и маркой связки. Из кубического нитрида бора выпускают шлифовальные круги, бруски и шкурки. Форма и размеры шлифовальных кругов из кубонита, которые изготовляет Опытный завод Института сверхтвердых материалов АН УССР, соответствуют ГОСТ 16167—70÷16180—70. Ленинградский абразивный завод «Ильич» изготовляет круги из эльбора по ГОСТ 17123—71. В табл. 44 представлены формы и основные размеры абразивного инструмента из эльбора и кубонита. Шлифовальные круги, как правило, изготовляют с концентрацией 100 и 150%. Так же как и для алмазного абразивного инструмента за 100%-ную концентрацию условно принято такое содержание кубонита, при котором в одном сантиметре объема рабочего слоя содержится 4,4 карата. При этом зерна кубонита занимают 25% объема рабочего слоя. Для других концентраций содержание порошка и объем, занимаемый ими, изменяется пропорционально.

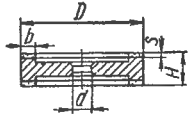
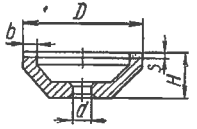
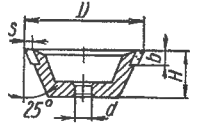
Выпускается инструмент на органических, металлических и керамических связках. Высокая теплостойкость кубического нитрида бора представляет более широкие возможности в выборе состава износостойкой металлической связки на основе железа, кобальта, твердого сплава и т. п. Инструмент из эльбора на керамической связке изготовляют различной твердости, аналогично инструменту из обычных абразивных материалов. Это имеет большое значение при выборе оптимальной характеристики инструмента для обработки материалов с различными физико-механическими свойствами. На органической связке выпускают круги из кубонита для чистового шлифования и доводки режущих инструментов из быстрорежущей стали; на металлической связке — круги для шлифования резьбы метчиков, фрез и другого резьбонарезного инструмента, шлифования профиля зубьев мелкомодульных червячных фрез, заточки быстрорежущего инструмента и др. На керамической связке изготовляют круги для шлифования стальных деталей, заточки инструмента из быстрорежущей стали, бруски для суперфиниширования колец подшипников и др.

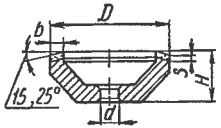
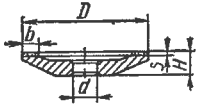
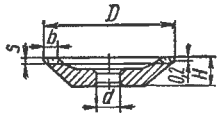
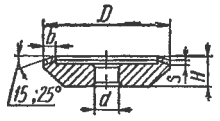
Таблица 44

Форма и основные размеры абразивного инструмента из кубического нитрида бора

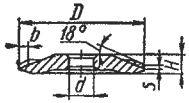
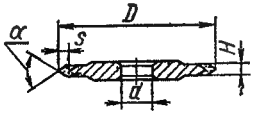
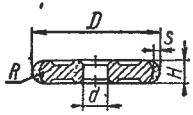
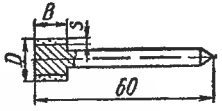
Круги	Сечение	Обозначение	Связка	Основные размеры в мм				
				D	*H*	*d*	*b*	*S*
Плоские прямого профиля		ЛПП	К	20—400	3,2—50	6—203	—	3; 5
			Б	80—400	3,2—25	20—203	—	3; 5
		КПП	Б	16—400	2—40	6—203	—	2—5
			М	25—400	6—40	6—203	—	3; 5
То же, без корпуса		Л1ПП	К	3—16	4—25	1—6	—	—
		К1ПП	Б	6—13	6; 10	2—4	—	—
Плоские прямого профиля трехсторонние		К2ПП	Б	125—250	6—20	32—127	4—12	2—4
Плоские с выточкой		ЛПВ	Б	100—250	20; 25	20—76	3—20	3
		КПВ	Б	80—300	18,5—32	20—127	3—60	1,5—5
			М	80—300	20—32	20—127	5—60	1,5—5
			К	80—150	20—25	20—51	3—20	3; 5

Продолжение табл. 44

Круги	Сечение	Обозначение	Связка	Основные размеры в мм				
				D	H	d	b	S
Плоскне с двухсторонней выточкой		ЛПВД	Б	100—250	12—25	20—76	3—20	3
		КПВД	Б	125—250	10—25	32—127	3—20	2—5
			М	125—250	13—25	32—127	5—20	2—5
			К	150	16	32—51	5—20	3
Чашечные конические		ЛЧК	Б	50—200	20—40	16—32	3—20	3
		КЧК	Б	50—250	20—52	16—127	3—20	1,5—5
			М	80—250	25—52	20—127	5—20	1,5—5
			К	50—150	21,5—42	16—51	3—20	3; 5
		К1ЧК	Б	80—150	32—40	20—51	5—10	2; 3

Круги	Сечение	Обозначение	Связка	Основные размеры в мм				
				D	*H*	*d*	*b*	*S*
Чашечные конические		К2ЧК	Б	50—150	20—40	16—51	3; 5	3—5
			М	80—150	25—40	20—51	5	3—5
Тарельчатые		ЛТ	Б	50—200	10—20	16—32	2—5	1,5
		КТ	Б	80—150	10—16	20—51	3—10	1,5
			М	80—150	10—16	20—51	3—10	1,5
		Л1Т	Б	50—200	10—20	16—32	2—5	3; 5
		К1Т	Б	80—150	10—16	20—51	1,5—5	2; 3
		Л3Т	Б	50—125	10; 12	15—32	3; 5	1,5; 2; 5
		К3Т	Б	80—150	10—16	20—51	3—10	1,5—3
			М	80—150	10—16	20—51	5; 10	1,5—3

Продолжение табл. 44

Круги	Сечение	Обозначение	Связка	Основные размеры в мм				
				D	*H*	*d*	*b*	*S*
Тарельчатые		К4Т	Б М	125—300	13—25	32—76	4—60	2; 3
Плоские с двусторонним коническим профилем		Л2П	Б	50—400	5—10	16—203	$\alpha =$ $= 30 \div 90°$	3; 5
		К2П	Б, М	125—350	6—10	32—203	$\alpha =$ $= 30 \div 120$	4; 5
Плоские с полукругло-выпуклым профилем		К5П	Б	80—150	4—32	20—51	$R =$ $= 1{,}5 \div 16$	4—7
			М	80—150	6—32	20—51	$R =$ $= 3 \div 16$	4—7
Головки шлифовальные цилиндрические		КГЦ	Б	6—12	—	3—6	8; 10	1,25—2,5
			М	8—12	—	4—6	8; 10	1,75—2,5

Примечание. Инструмент с начальной буквой Л изготовляют из эльбора, а с буквой К — из кубонита; виды связок: М — металлическая, Б — органическая, К — керамическая.

Таблица 45

Основные области применения связок иструмеита из кубонита

Связка	Инструмент	Область применения
Органическая		
Б1	Все формы	Чистовое шлифование и доводка инструмента с охлаждением и без иего и заточка с охлаждением
Б4	Круги прямого профиля КПП	Круглое и плоское шлифование с охлаждением
Б8	Тарельчатые круги	Зубошлифование без охлаждения
Керамическая		
К19	Круги КЧК, КПВ, КПВД	Доводка ииструмента без охлаждения
Металлическая		
М1	Круги К2П	Шлифование резьбы метчиков, фрез и другого резьбонарезного инструмента; шлифование мелкомодульных червячных фрез с охлаждением
М04	Круги КЧК, КТ, К3Т, КПП, КПВ, КПВД, КГЦ, К2ЧК	Заточка инструмента с охлаждением, круглое и плоское шлифоваиие с охлаждением

В табл. 45 приведены основные марки связок, на которых изготовляют инструмент из кубонита и основные области его применения. Инструмент на органической и керамической связках может применяться с охлаждением и без него, на металлической связке — только с охлаждением. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости при шлифовании не следует применять воду, так как при этом увеличивается расход кубонита. При шлифовании кругами из кубонита на различных связках могут быть рекомендованы режимы, указанные в табл. 46. Приемы конструирования и методы изготовления инструментов из кубонита аналогичны методам изготовления инструментов из алмаза. Применяют те же формулы рас-

Таблица 46

Режимы обработки кругами из кубоиита

Обработка	Связка	Режимы обработки			
		Скорость вращения круга в м/с	Поперечная подача в мм/дв. ход	Продольная подача в м/мнн	Глубнна шлифования в мм
Доводка без охлаждения	Органическая	20—25	0,01	1,0	—

Продолжение табл. 46

Обработка	Связка	Режим обработки			
		Скорость вращения круга в м/с	Поперечная подача в мм дв. ход	Продольная подача в м/мин	Глубина шлифования в мм
Заточка с охлаждением	Органическая	20—25	0,03—0,05	1—1,5	—
	Металлическая	20—35	0,04—0,06	2,0—3	—
	Керамическая	25—30	0,04—0,05	1—1,5	—
Плоское шлифование с охлаждением	Органическая	25—30	0,5—1 мм/ход	6—10	0,01—0,03
Круглое шлифование с охлаждением	Органическая	30—35 *	—	0,5—1,0	0,005
Шлифование резьбы с охлаждением	Металлическая	40—45 **	—	—	0,1—0,2

*Скорость вращения изделия 20—30 м/мин.
** Скорость вращения изделия 0,8—1 м/мин.

чета массы связки и абразива, технологические приемы приготовления шихты, формования рабочего слоя, термической обработки, соединения с корпусом и окончательной механической обработки. Маркировка кругов из кубонита должна содержать те же сведения, что и кругов из алмаза.

§ 2. ИНСТРУМЕНТ ИЗ НОВЫХ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Успехи науки в области физики высоких давлений и практическое использование этих результатов для синтеза алмазов и кубического нитрида бора, а также исследования по созданию композиционных сверхтвердых материалов позволили разработать новые инструментальные материалы с уникальными физико-механическими и эксплуатационными свойствами. На основе порошка синтетического алмаза и кубического нитрида бора при высоких давлениях и температурах изготовляют поликристаллические образования, применяемые для изготовления резцов, фильер, выглаживателей и др. В Советском Союзе синтезируют поликристаллические алмазы АСБ (баллас) и АСПК (карбонадо), а также материал под названием

СВ. В США подобный материал выпускают под названием мегадаймонд. На основе нитрида бора, кубического и вюрцитоподобного нитрида бора с помощью высоких давлений и температур выпускают поликристаллические сверхтвердые материалы. В зависимости от исходного сырья и технологии производства эти материалы носят различные названия. Так, Томилинский завод алмазного инструмента выпускает эльбор-Р, Опытный завод Института сверхтвердых материалов — исмит трех марок, Полтавский завод искусственных алмазов и алмазного инструмента совместно с Институтом проблем материаловедения АН УССР — гексанит-Р, фирма Дженерал-Электрик (США) — боразон БРВ.

Перечисленные материалы, хотя и имеют очень высокую твердость, не относятся к абразивным и большинство из них применяют для обработки резанием различных материалов, в том числе и таких, которые обрабатывались только с использованием кристаллов природных алмазов. Например, сверхтвердые материалы баллас и карбонадо эффективно используют для оснащения выглаживателей, волок и резцов для точения неметаллических материалов, цветных металлов и др. Эльбор-Р, исмит и другие поликристаллические материалы из кубического нитрида бора наиболее эффективны при точении деталей из черных металлов и титановых сплавов. Новый материал славутич применяется при изготовлении буровых долот и правящих инструментов.

Баллас и карбонадо представляют собой поликристаллические алмазные образования округлой формы диаметром 4—6 мм, массой 0,4—0,7 каратов. Их получают синтезом из графита в камерах высокого давления в присутствии катализаторов примерно при тех же параметрах, что и при производстве алмазов. Полученные поликристаллы очищают от остатков графита и отбирают из них образования округлой формы без трещин, раковин и сколов. Баллас и карбонадо имеют высокую твердость, износостойкость, теплопроводность и некоторые другие характеристики, близкие к свойствам природных алмазов. К их недостаткам следует отнести низкую стойкость при высокой температуре. Например, при температуре свыше 700° С поликристаллы балласа при малейшей нагрузке превращаются в зеленоватый порошок. Низкая теплостойкость синтетических алмазов затрудняет технологию изготовления инструмента. Следует отметить также, что алмазы баллас и карбонадо имеют коэффициент линейного расширения, существенно отличающийся от металлов, обычно применяемых для закрепления природных алмазов. Из-за этого вставки, изготовленные из балласа и карбонадо, при запрессовке их методом порошковой металлургии растрескиваются задолго до того, как будет достигнута температура графитизации. Однако советские ученые разработали специальные методы закрепления вставок в металлических матрицах, которые лишены указанных недостатков.

Из алмазов баллас и карбонадо изготовляют резцы и выглаживатели. Кроме того, из алмазов баллас делают волоки. Резцы из балласа преимущественно предназначены для точения специальной полуспеченной керамики, пресс-материалов, стеклопластика, высо-

кокремнистого алюминия и т. п. Карбонадо используется для изготовления резцов, заменяющих твердосплавные, а в некоторых случаях и алмазные, при обработке более вязких материалов, например цветных сплавов. Кромки у резцов из карбонадо острее, чем у резцов из балласа. Для обработки черных металлов и титановых сплавов, в процессе резания которых выделяется большое количество тепла, вследствие чего режущая кромка инструмента нагревается до высоких температур, резцы из балласа и карбонадо малопригодны.

Конструкция резцов из балласа и карбонадо не отличается принципиально от алмазных. Использование режущих элементов в виде вставок, закрепляемых механическим путем в державке, позволяет создавать многообразные конструкции резцов из унифицированных элементов. На Томилинском заводе алмазного инструмента разработан метод заточки и переточки резцов в условиях предприятий-потребителей. Резцы затачивают на универсально-заточных станках типа ЗА64Д алмазными кругами АПВ и АЧК 150×20×3 мм из алмазов АСВ100/80—АСВ50/40 на металлической связке и алмазов АСР100/80—АСР50/40 на органической связке. Режимы заточки резцов: окружная скорость круга 25—30 м/с, продольная подача 0,5—2 м/мин, поперечная подача 0,005—0,01 мм/дв. ход. Для заточки используют приспособления, в которых резец закрепляется и устанавливается под заданным углом к шлифовальному кругу. Высокий класс шероховатости режущей поверхности резцов получают, обрабатывая их на типовых ограночных станках с использованием стальных дисков, шаржированных алмазными микропорошками. В некоторых случаях применяют круги на органической связке Б3 из алмазов АСМ 40/28. Огранку ведут «на режущую кромку». Для резцов из балласа и карбонадо характерны следующие углы заточки: отрицательный передний угол $\gamma = 0 \div 4°$; задний угол $\alpha = 6 \div 8°$; главный угол в плане $\varphi = 30 \div 60°$; вспомогательный угол в плане $\varphi_1 = 5 \div 15°$. Вершина резца скруглена радиусом 0,3—0,6 мм. При огранке шероховатость доведенной поверхности должна соответствовать 8-му классу для резцов из балласа и 10-му классу для резцов из карбонадо. Стойкость резцов при обработке материалов и соблюдении режимов резания, указанных в табл. 47, при прочих равных условиях выше стойкости

Таблица 47

Режимы резания резцами из синтетических алмазов

Материал обрабатываемой детали	Режимы резания		
	Скорость резания в м/мин	Продольная подача в мм/об	Глубина резания в мм
Стеклопластики и пластмассы	400—600	0,04—0,07	0,5—1,0
Керамика	200—300	0,3—0,5	0,3—0,5
Высококремнистые цветные сплавы	300—700	0,02—0,07	0,1—0,5

резцов из твердых сплавов в 70—100 раз, а в некоторых случаях приближается к стойкости резцов из природных алмазов.

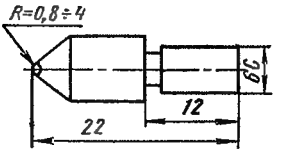


Рис. 120. Выглаживатели, оснащенные сверхтвердыми материалами

Волоки из синтетических алмазов баллас используют для изготовления проволоки не только из цветных металлов, но и из высокоуглеродистых и легированных сталей. Волоки устанавливают на том же оборудовании, на котором ранее использовались волоки из твердого сплава и природных алмазов. Технология изготовления волок из балласа имеет много общего с изготовлением волок из природных алмазов. Контроль профиля канала в процессе обработки из-за непрозрачности балласа может быть произведен только косвенным путем по измерениям образцов проволоки, протянутых через фильеры. Каналы волок сверлят как механическим путем, на ультразвуковых станках с использованием стальных игл и алмазной пасты, так и электроннолучевым методом.

Угол волочения в волоках из балласа принимается меньшим, чем при использовании природных алмазов. К недостаткам синтетических алмазов баллас, используемых для изготовления волок, относится нестабильность качества, трудность отбраковки негодных кристаллов. Тем не менее волоки из балласа нашли широкое применение в промышленности. Средняя стойкость комплектов таких волок во много раз превышает стойкость твердосплавных.

Выглаживатели из балласа и карбонадо рекомендуются для формирования поверхностного слоя, снижения шероховатости поверхности деталей из закаленной и незакаленной сталей, латуни, бронзы, алюминиевых сплавов и т. д. Выглаживающий наконечник (рис. 120) состоит из державки, в которой закреплена зачеканкой или серебрянным припоем вставка из поликристалла балласа, ограненного в виде шара. Наконечник устанавливают в приспособлении, закрепляемом в суппорте токарного станка, и прижимают к вращающейся детали с усилием 10—20 кгс. В зону обработки подают охлаждающую жидкость — индустриальное масло. В результате наклепа поверхности и некоторого уплотнения структуры повышается усталостная прочность детали и снижается шероховатость поверхности. Рекомендуемые геометрические параметры инструментов и режимы выглаживания приводятся в табл. 48.

Алмазы баллас и карбонадо используются также для изготовления буровых коронок, правящих инструментов и порошков, которые пригодны для выпуска абразивного инструмента.

Поликристаллический кубический нитрид бора. Резцы из балласа и карбонадо нельзя применять для точения деталей из черных металлов. Для обработки этих материалов созданы поликристаллические вещества на основе кубического нитрида бора: эльбор-Р, исмит и гексанит-Р. Как правило, поликристаллы из кубического нитрида бора образуются из плотно прилегающих зерен размером до 100 мкм, сросшихся сложным образом и разделенных незначительным количеством специального маточного вещества. Резцы из

Таблица 48

Режимы выглаживания

Материал обрабатываемой детали	Радиус закругления сферы в мм	Режимы обработки	
		Скорость в м/мин	Продольная подача в мм/об
Незакаленные стали; бронза	2,5—3,0	40—80	0,02—0,07
Алюминиевые сплавы		40—100	До 0,1
Закаленные стали твердостью *HRC* 30—45	1,5—2,5	40—80	0,02—0,07
Закаленные и цементованные стали твердостью свыше *HRC* 45	1,0—1,5		

КНБ (кубического нитрида бора) весьма эффективны при обработке деталей из высокотвердых сталей *HRC* 40—65. Обеспечивая высокую производительность, эти резцы вместе с тем позволяют получить при обработке шероховатость поверхности в пределах 7—9-го класса и точность 1—2-го класса, что ранее могло быть достигнуто только при абразивной обработке. Применение резцов из поликристаллических материалов эффективно как в основном, так и в инструментальном производстве. Режимы резания резцами из эльбора-Р, технология изготовления и заточки, формы вставок и конструкции державок аналогичны описанным выше для алмазных резцов.

Славутич — новый сверхтвердый материал, созданный Институтом сверхтвердых материалов АН УССР. Не уступая природным алмазам по износостойкости, славутич значительно превосходит их по прочности. В то время как размеры природных алмазов, пригодных для бурения скважин, ограничены, из славутича могут быть изготовлены породоразрушающие элементы практически любых размеров. Если форма отдельных кристаллов алмазов имеет случайные геометрические параметры, то изделия из славутича могут быть изготовлены любой формы в зависимости от конструкции инструмента и условий его применения. Стоимость славутича ниже стоимости крупных природных алмазов.

Славутич выпускается только в СССР. Из него изготовляют долота для бурения скважин, правящие карандаши, ролики и блоки. Применяется славутич также для оснащения измерительного инструмента. Славутич изготовляют в виде вставок любой формы. По технологическим соображениям предпочтительной является форма, ограниченная поверхностями вращения: цилиндры с плоским или сферическим торцом, сегменты, кольца и т. п. Вставки впаивают в корпуса, изготовленные из конструкционных сталей. Применяют как цельные, так и составные корпуса сварной конструкции

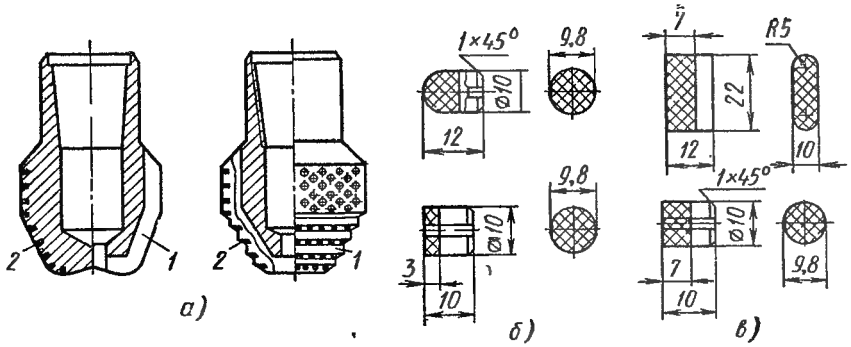
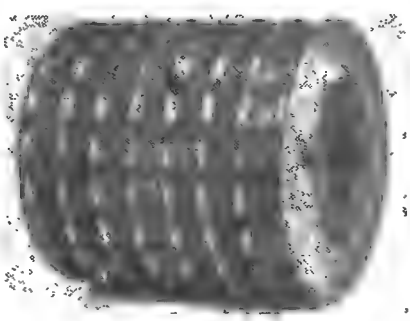


Рис. 121. Некоторые формы долот (*а*) и вставок (*б* и *в*) из славутича: *1* — корпус; *2* — вставка

(рис. 121). Долота, изготовленные из славутича, в 1,5—2 раза дешевле долот, оснащенных крупными природными алмазами, и отличаются простотой и надежностью конструкции, низкой чувствительностью к ударным нагрузкам и большей механической скоростью бурения по сравнению с алмазными. В настоящее время буровые долота из славутича выпускаются 50-ти типовых размеров диаметром 90—400 мм.

Созданный первоначально для буровых инструментов славутич оказался весьма эффективным для оснащения правящих карандашей, форма и размеры которых соответствуют ГОСТ 607—63, пластин и брусков, сложнопрофильных правящих блоков и роликов диаметром 60—150 мм, шириной 20—100 мм и более. По своим эксплуатационным показателям инструменты из славутича не только не уступают традиционным правящим инструментам из природных алмазов, но во многих случаях превосходят их. Так, замена славутичем карандашей с укладкой алмазов цепочкой или слоями позволяет сократить затраты на изготовление инструмента не менее чем в 1,5 раза и, кроме того, благодаря высоким правящим свойствам славутича уменьшить расход шлифовальных кругов на 10—15%, что также приносит ощутимую выгоду. Бруски размером 80×30×30 мм, оснащенные 14 цилиндрическими вставками из славутича, при правке торцов шарошлифовальных кругов высокой твердости работают в автоматическом режиме до износа 1200—1800 ч, что в 2—2,5 раза больше ранее применяемого алмазного правящего инструмента.

Рис. 122. Правящий ролик из славутича



Технологические возможности славутича в полной мере реализуются при изготовлении сложнофасонных правящих инструментов

в виде роликов, один из которых показан на рис. 122. Точная доводка профиля такого инструмента производится на модернизированном оптико-шлифовальном станке 395М алмазным кругом на металлической связке. Скорость вращения алмазного круга 45 м/с, ролика 0,2 м/с. Контроль точности обработки производится с помощью оптического устройства, проектирующего увеличенное изображение профиля обрабатываемой поверхности на специальный экран, на котором наносится требуемый профиль инструмента. Фактически обработка ролика ведется по шаблону, что позволяет достичь высокой точности линейных размеров (до 0,01 мм) при угловых отклонениях, не превышающих 5—10 мин. Ролики из славутича применяются для правки кругов, используемых при шлифовании прецизионных деталей двигателей внутреннего сгорания, деталей вырубных штампов, беговых дорожек подшипников, калибров прокатных валков и др. Применение правящих роликов обеспечивает повышение производительности обработки в 2—5 раз при длительности эксплуатации каждого 1,5—2 года. Новой областью использования славутича является применение его в качестве конструкционного материала. Измерительная скоба с пластинками из славутича не изменяет размер после измерения диаметра 800 тыс. чугунных деталей, тогда как стальная изнашивается на 1 мкм после 1400 измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абразивный** инструмент из синтетических алмазов. Под общей ред. В. Н. Бакуля. Киев, «Техника», 1966, 58 с.

2. **Бакуль В. Н.** Синтетические алмазы и их применение в Советском Союзе. Киев, «Техника», 1966, 26 с.

3. **Гуревич А. С.** Оборудование для производства абразивных инструментов. М.—Л., «Машиностроенне», 1964, 260 с.

4. **Ипполитов Г. М.** Абразивно-алмазная обработка. М., «Машиностроение», 1969, 335 с.

5. **Кудасов Г. Ф.** Абразивные материалы и инструменты. М.—Л., «Машиностроение», 1967, 159 с.

6. **Лурье Г. Б.** Шлифование металлов. М., «Машиностроенне», 1969, 175 с.

7. **Любомудров В. Н., Васильев Н. Н.** и **Фальковский Б. И.** Абразивные инструменты и их изготовление. М.—Л., Машгиз, 1953, 376 с.

8. **Несмелов А. Ф.** Алмазные инструменты в промышленности. М., «Машиностроение», 1964, 343 с.

9. **Производство** абразивных материалов. Под ред. В. Н. Крылова. М.—Л., «Машиностроение», 1968, 179 с.

10. **Справочник** по алмазной обработке металлорежущего инструмента. Под общей ред. В. Н. Бакуля. Киев, «Техника», 1971, 208 с.

11. **Ферсман А. Е.** Кристаллографня алмаза. М., Изд-во Академии наук СССР 1965, 566 с.

12. **Шафрановский И. И.** Алмазы. М.—Л., «Наука», 1964, 174 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Абразивный материал
— природный 5
— искусственный 5
Абразивный инструмент
— шлифовальный 5, 79
— полировальный 5, 79
Абразивная способность 40, 69
Алмаз
— природный 7
— синтетический 11, 23
Алмазный абразивный инструмент 144
Алюмобакелит 187
Апатит 43
Аппретирование 142

Б

Баллас 9, 287
Бакелизация 133
Бескерновый наконечник 260
Блок-процесс 13
Боксит 12
Боразон 12
Бориды 27
Борсиликокарбид 12
Борт 9, 258
Браковочная неуравновешенность 86
Брикетирование 218

В

Вальцевание 201
Вальцы каландровые 138
Волоки алмазные 265
Вулканизация 136, 140
Выплавка электрокорунда
— на выпуск 13
— на блок 13

Г

Гальванопластика 238
Гальваностегия 231
Гексанит-Р 287
Гидроклассификация 29
Гипс 43
Гранат 6
Графит 8

Д

Декстрин
— палевый 108
— желтый 108
Дендриты 231
Дисбаланс остаточный 171
Диссоциация 223

З

Зерновой состав 31
Зернистость (диапазон)
— широкий 45
— узкий 45

И

Иглы алмазные 255
Идитол 137
Исмит 286
Импрегнированные коронки 258

К

Каландрирование 139
Кальцит 43
Карандаши алмазно-металлические 255
Карат метрический 9
Карбонадо 9, 287
Карбид кремния
— зеленый 12, 18
— черный 12, 18
Карбид бора 12,21
Карбиды 12, 21
Кварц 7
Кварц жильный 7
Кварцевый песок 7
Кварцит 7
Кимберлит 11
Комплексная фракция 31
Коронки алмазные
— однослойные 257
— многослойные 257
— импрегнированные 257
Корунд 6
Коэффициент шлифования 172
Кремень 7
Кубический нитрид бора
— кубонит 27, 280
— эльбор 27, 280

М

Маслянистость 71
Масса утряски 62
Металлизация 58
Метод Миндта 41
Модуль боксита
— кремниевый 12
— кальциевый 12
Модуль силикатный 107
Монокорунд 12, 17
Мягчители 137

Н

Наконечники бескерновые 260
Наполнение (предел) 136
Наполнитель 136, 188
Насыпная масса 39, 62, 208
Насыпной объем 62
Наждак 6
Неуравновешенность
— динамическая 85
— статическая 85
— браковочная 86
Нитриды 27

О

Обогащение 47
Обсидиан 105
Огнеупорность 106
Оксисульфидная плавка 17
Ортоклаз 43

П

Паста
— доводочная 71
— полировочная 71
— мазеобразная 75
— твердая 75
— густая 75
— жидкая 75
Песчаник 7
Плавка оксисульфидная 17
Плавни 107
Пластичность 106
Пластификатор 269
Плоскость спайности 275
Ползучесть 80
Полидиены 137
Поликонденсация 198
Порошки
— алмазные 43
— кубоннтовые 67
— эльборовые 67
— абразивные 31
Последействие упругое 222
Предел наполнения 136
Прессуемость 208
Прессование 114
Прочность порошков 42

Р

Расход алмаза 171
Расшнритель калибрующий
— полосчатый 260
— кольцевой 260
— пятачковый 260
Рекуперация 204, 251
Ролики алмазные 255

С

Связка
— керамическая 80
— бакелитовая 80
— вулканнтовая 80
— снликатовая 81
— адгезионно-активная 207
— магнезиальная 81
— металлическая 168
— органическая 168
— плавящаяся 102
— спекающаяся 102
— однокомпонентная 105
— многокомпонентная 105
Связующая способность 106
Силнкат — глыба 107
Славутич 290
Состав зерновой 31
Спайность (плоскость) 136
Структура
— закрытая 83
— открытая 83
— средняя 83
Сульфитный щелок 108

Т

Тальк 43, 107
Твердость
— минералов 43
— абразивного инструмента 81
Температура размягченнн 106
Технические требования 169
Топаз 43

У

Угол смачивания 211
Удельный расход 171
Упругое последействне 222
Уравновешенность 170

Ф

Фасет 277
Формование 114, 132
Флюорит 43
Фракция абразивного порошка
— основная 30
— побочная 30
— комплексная 30
Фракцня алмазного порошка
— основная 44
— крупная 44
— мелкая 44
Фриттование 100

Х

Характеристнка абразивного инструмента
— связка 80
— твердость 81
— структура 83
— прочность 83

Ш

Шихта
— связки 184
— алмазоносного слоя 184
Шлнкерная масса 109
Шпат полевой 107

Щ

Щелок сульфитный 108

Э

Электрокорунд
— нормальный 12
— белый 14
— легированный 16
— титанистый 16
— хромнстый 16
— монокорунд 17
Эльбор-Р 287
Эпитаксиальный процесс 25
Эластичный инструмент 153

ИЗГОТОВЛЕНИЕ АБРАЗИВНОГО И АЛМАЗНОГО ИНСТРУМЕНТА